



Universidade Federal do Rio Grande  
Instituto de Matemática, Estatística e Física  
Pós Graduação em Modelagem Computacional

---

# Rotina Computacional de Obtenção, Tratamento e Visualização de Dados Oceanográficos

---

**Discente:** Carlos Alberto Bertin Catharina  
**Orientador:** Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Rio Grande, 2016

Universidade Federal do Rio Grande  
Instituto de Matemática, Estatística e Física  
Pós Graduação em Modelagem Computacional

**Rotina Computacional de Obtenção,**  
**Tratamento e Visualização de**  
**Dados Oceanográficos**

**Discente:** Carlos Alberto Bertin Catharina  
**Orientador:** Prof. Dr. Wiliam Correa Marques

Dissertação apresentada à banca  
examinadora da Universidade Federal  
do Rio Grande, como exigência parcial  
para obtenção do título de Mestre em  
Modelagem Computacional pelo Programa  
de Pós-Graduação em Modelagem  
Computacional.

Março de 2016

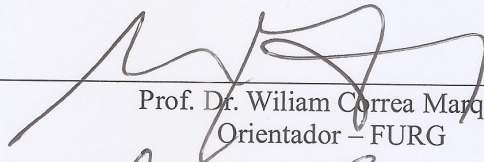
CARLOS ALBERTO BERTIN CATHARINA

“Rotina Computacional de Obtenção, Tratamento e Visualização de Dados Oceanográficos”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de concentração: Modelagem Computacional.

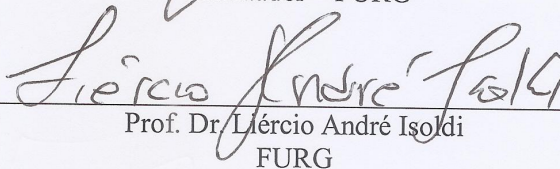
Aprovada em

BANCA EXAMINADORA



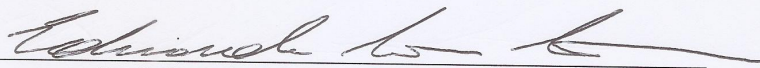
---

Prof. Dr. William Correa Marques  
Orientador – FURG



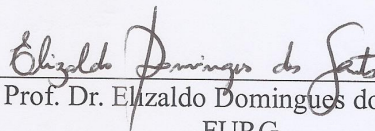
---

Prof. Dr. Liércio André Isoldi  
FURG



---

Prof. Dr. Eduardo Costa Couto  
UFPEL



---

Prof. Dr. Elizaldo Domingues dos Santos  
FURG

Rio Grande - RS  
2016

## Agradecimentos

Agradeço a Deus pela benção da vida, por ter saúde, uma família maravilhosa e por saber que posso contar com Ele em todos os momentos.

Aos meus pais e irmão, por todo o amor e apoio incondicional.

Ao Prof. Dr. Wiliam Correa Marques, que aceitou ser meu orientador, demonstrando ter pleno conhecimento sobre os assuntos discorridos e problemas enfrentados durante o mestrado.

Aos professores Jeferson Avila Souza, Diana Adamatti, Fabrício Ferrari, Angélica Miranda e Leonardo Emmendorfer, pelo apoio à realização deste trabalho.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional por ter oportunizado experiências e troca de conhecimentos entre colegas e demais professores do programa.

A todos os colegas do LANSO (Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos), por proporcionarem um ambiente de união, sadio e amigável.

A minha namorada Patricia, que em todos os momentos me incentivou a estudar mais.

Agradeço a Universidade Federal Fluminense (UFF), pelo apoio concedido na liberação da minha licença para capacitação, a qual foi de vital importância para a viabilização deste trabalho.

Agradeço a todos que, de alguma forma, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta importante etapa na minha vida.

"Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes."

**Marthin Luther King**

# Resumo

## Rotina Computacional de Obtenção, Tratamento e Visualização de Dados Oceanográficos

Atualmente, sensores remotos e computadores de alto desempenho estão sendo utilizados como instrumentos principais na coleta e produção de dados oceanográficos. De posse destes dados, é possível realizar estudos que permitem simular e prever o comportamento do oceano por meio de modelos numéricos regionais. Dentre os fatores importantes no estudo da oceanografia, podem ser destacados àqueles referentes aos impactos ambientais, de contaminação antrópica, utilização de energias renováveis, operações portuárias e etc. Contudo, devido ao grande volume de dados gerados por instituições ambientais, na forma de resultados de modelos globais como o HYCOM (*Hybrid Coordinate Ocean Model*) e dos programas de Reanalysis da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), torna-se necessária a criação de rotinas computacionais para realizar o tratamento de condições iniciais e de contorno, de modo que possam ser aplicadas a modelos regionais como o TELEMAC3D ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)). Problemas relacionados a baixa resolução, ausência de dados e a necessidade de interpolação para diferentes malhas ou sistemas de coordenadas verticais, tornam necessária a criação de um mecanismo computacional que realize este tratamento adequadamente. Com isto, foram desenvolvidas rotinas na linguagem de programação Python, empregando interpoladores de vizinho mais próximo, de modo que, a partir de dados brutos dos modelos HYCOM e do programa de Reanalysis da NOAA, foram preparadas condições iniciais e de contorno para a realização de uma simulação numérica teste. Estes resultados foram confrontados com outro resultado numérico onde, as condições foram construídas a partir de um método de interpolação mais sofisticado, escrita em outra linguagem, e que já vem sendo utilizada no laboratório. A análise dos resultados permitiu concluir que, a rotina desenvolvida no âmbito deste trabalho, funciona adequadamente para a geração de condições iniciais e de contorno do modelo TELEMAC3D. Entretanto, um interpolador mais sofisticado deve ser desenvolvido de forma a aumentar a qualidade nas interpolações, otimizar o custo computacional, e produzir condições que sejam mais realísticas para a utilização do modelo TELEMAC3D.

**Palavras-Chave:** Oceanografia; Python; TELEMAC3D; HYCOM; Reanalysis.

# Abstract

## Computational Script for Obtaining, Treatment and Visualization of Oceanographic Data

Currently, remote sensors and high-performance computers are being used as the main instruments in the surveying and production of oceanographic data. Using these data sets, numerical studies can be carried in order to simulate and predict the oceanic behaviour through regional numerical models. Among the important factors for the study of oceanography, it can be highlighted those studies related to environmental impacts of anthropogenic contamination, use of renewable energy, the port operations and etc. However, due to the large volume of data generated by environmental institutions, as the results of the global model HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) and the Reanalysis program of NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), it becomes necessary the construction of computational scripts in order to perform processing of initial and boundary conditions that can be applied to regional models as TELEMAC3D ([www.opentelemac.org](http://www.opentelemac.org)). Problems related to low resolution, lack of data and the necessity of interpolation for different meshes or vertical coordinate systems increase the necessity of creation of a computational mechanism that performs these treatment properly. In this work, some scripts were developed in Python programming language and using the nearest neighbour interpolation. In this sense, the raw data from HYCOM model and Reanalysis program were prepared as initial and boundary conditions for performing a numerical simulation test. These results were compared with another numerical results where the initial and boundary conditions were constructed from a more sophisticated interpolation method, written in another language, and that is already being used in the laboratory. Based on the results, it can be concluded that the routine developed properly works for the generation of initial and boundary conditions of TELEMAC3D model. However, a more sophisticated interpolation must be implemented in order to increase the quality of the interpolations, optimize the computational cost, and the production of initial and boundary conditions more realistic for the use of TELEMAC3D model.

**Palavras-Chave:** Oceanography; Python; TELEMAC3D; HYCOM; Reanalysis.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	p.1
1.1	Alguns aspectos importantes da Oceanografia . . . . .	p.1
1.2	Dados Oceanográficos . . . . .	p.5
1.3	ESTADO DA ARTE . . . . .	p.6
1.3.1	OOFe - <i>Operational Ocean Forecast Python Engine</i> . . . . .	p.6
1.3.2	GWVis - <i>Ground-Water Visualization Application</i> . . . . .	p.7
1.3.3	Scripts em Python para os simuladores SHEMAT e TOUGH2 . . . . .	p.7
1.3.4	Metview . . . . .	p.8
1.4	JUSTIFICATIVA . . . . .	p.9
1.5	OBJETIVOS . . . . .	p.12
1.5.1	Objetivo Geral . . . . .	p.12
1.5.2	Objetivos Específicos . . . . .	p.12
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	p.13
2.1	Dados globais de circulação oceânica . . . . .	p.14



2.2	Dados globais de circulação atmosférica . . . . .	p. 16
2.3	Modelo hidrodinâmico - TELEMAC3D . . . . .	p. 17
2.3.1	Equacionamento do modelo . . . . .	p. 19
2.4	Geração da Grade de Elementos Finitos . . . . .	p. 24
2.5	Linguagem de Programação Python . . . . .	p. 25
2.6	O formato de dados NetCDF . . . . .	p. 28
2.7	Interpolação . . . . .	p. 30
2.8	Diagramas de desenvolvimento do trabalho . . . . .	p. 32
2.8.1	1ª Etapa: Geração da Malha . . . . .	p. 33
2.8.2	2ª Etapa: Requisição dos Dados . . . . .	p. 35
2.8.3	3ª Etapa: Tratamento dos Dados . . . . .	p. 36
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	p. 40
3.1	Banco de dados do Reanalysis-NOAA . . . . .	p. 40
3.1.1	Variável Temperatura do Ar . . . . .	p. 41
3.1.2	Variável Pressão Atmosférica . . . . .	p. 43
3.1.3	Variável Intensidade do Vento - Componentes U e V . . . . .	p. 45
3.2	Banco de dados do HYCOM . . . . .	p. 49
3.2.1	Variável Salinidade . . . . .	p. 49
3.2.2	Variável Temperatura . . . . .	p. 53
3.2.3	Variável Intensidade da Corrente: Componente U e Componente V . . . . .	p. 57
3.3	Análise de Diferenças em Simulações Numéricas . . . . .	p. 62

3.3.1	Variáveis de saída do modelo TELEMAC3D . . . . .	p.63
4	<b>CONCLUSÕES</b>	p.78
5	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	p.80

# Lista de Figuras

1.1	Instrumentos Oceanográficos (Silva, 2014) . . . . .	p. 10
2.1	Coordenadas Verticais (Assad et al., 2009) . . . . .	p. 15
2.2	Dados multidimensionais em 3 e 4 dimensões. Adaptado de: (ArcGIS-Pro, 2015) . . . . .	p. 30
2.3	Método de interpolação de vizinho mais próximo (Namikawa, 1995) . . . . .	p. 31
2.4	Diagrama Geral . . . . .	p. 32
2.5	Malha numérica em elementos finitos da PCSSB. A barra de cores indica a profundidade local em metros. . . . .	p. 34
2.6	Esquema do arquivo de condições de contorno e triangularização da malha de elementos finitos. . . . .	p. 35
2.7	Requisição dos dados junto ao banco de dados do LANSO. . . . .	p. 36
2.8	Tratamento dos Dados Oceanográficos para a malha batimétrica do modelo TELEMAC3D. . . . .	p. 38
3.1	Comparação da variável temperatura do ar. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 42

3.2	Resultado da temperatura do ar aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.2a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (3.2b), o dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 43
3.3	Comparação da variável pressão atmosférica. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 44
3.4	Resultado da pressão atmosférica aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.4a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.4b), o dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 45
3.5	Comparação da intensidade da componente U do vento. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 46
3.6	Comparação da intensidade da componente V do vento. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 47
3.7	Resultado da componente U do vento aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.7a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.7b), o dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 48
3.8	Resultado da componente V do vento aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.8a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.8b), o dia 6 de julho de 2014. . . . .	p. 48
3.9	Comparação da variável salinidade. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As (Figuras 3.9a. e b. representam o nível 1 (superfície), as 3.9c. e d. o nível 4 (profundidade 30 m) e as 3.9e e f, o nível 10 (profundidade 200 m). . . . .	p. 51
3.10	Resultado da salinidade aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.9a o nível sigma 1, 3.9b o nível sigma 4 e 3.9c o nível sigma 10. . . . .	p. 52

3.11	Comparação da variável temperatura. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As (Figuras 3.11a e b) representam o nível 1 (superfície), as (3.11c e d) o nível 4 (profundidade 30 m) e a (3.11e e f) o nível 10 (profundidade 200 m). . . . .	p. 55
3.12	Resultado da temperatura aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.9a. o nível sigma 1, 3.9b. o nível sigma 4, 3.9c. e o nível sigma 10. . . . .	p. 56
3.13	Comparação da variável velocidade da corrente - componente U. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As figuras (3.13a e b) representam o nível 1 (superfície), (3.13c e d), o nível 4 (profundidade 30 m) e (3.13e e f), o nível 10 (profundidade 200 m). . .	p. 58
3.14	Comparação da variável velocidade da corrente - componente V. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As figuras (3.14a e b) representam o nível 1 (superfície), (3.14c e d), o nível 4 (profundidade 30 m) e (3.14e e f), o nível 10 (profundidade 200 m). . . . .	p. 59
3.15	Resultado da velocidade da corrente - componente U, aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.15a o nível sigma 1, 3.15b o nível sigma 4, 3.15c e o nível sigma 10. . . . .	p. 60
3.16	Resultado da velocidade da corrente - componente V aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.16a o nível sigma 1, 3.16b o nível sigma 4, 3.16c e o nível sigma 10. . . . .	p. 61
3.17	Pontos de amostras do comportamento das variáveis de saída do modelo TELEMAC3D. . . . .	p. 62
3.18	Comparação entre os campos médios de pressão atmosférica entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 64
3.19	Séries temporais de pressão atmosférica obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 65

3.20	Comparação entre os campos médios de intensidade do vento entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 66
3.21	Séries temporais de intensidade do vento obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 67
3.22	Comparação entre os campos médios de salinidade da água do mar na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 69
3.23	Séries temporais da salinidade da água do mar no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 70
3.24	Comparação entre os campos médios de temperatura da água do mar na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 71
3.25	Séries temporais da temperatura da água do mar no nível sigma 10 obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 72
3.26	Comparação entre os campos médios de velocidade da corrente - componente U, na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 74
3.27	Comparação entre os campos médios de velocidade da corrente - componente V, na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 75
3.28	Séries temporais da velocidade da corrente - componente U, no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 76
3.29	Séries temporais da velocidade da corrente - componente V no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014. . . . .	p. 77

## Lista de Símbolos

$R_n$	Vizinho mais próximo.
$\bar{d}$	Distância média observada do vizinho mais próximo.
$\rho$	Massa específica da água ( $Kg/m$ )
$F_x$	Termo fonte do momento da equação u
$F_y$	Termo fonte do momento da equação v
$g$	Aceleração gravitacional ( $m/s$ )
$t$	Tempo (s)
$u$	Primeira componente da velocidade ( $m/s$ )
$v$	Segunda componente da velocidade ( $m/s$ )
$Z$	Elevação da superfície ( $m$ )
$P, p$	Pressão
$\Delta\rho$	Variação da densidade
$S$	Elevação da superfície livre do mar
$f$	Coeficiente de coriolis
$C_f$	Coeficiente de fricção adimensional
$\vec{W}$	Intensidade do vento ( $m/s$ )
$(\phi)$	Latitude em graus
$T$	Temperatura ( $K$ )
$h$	Profundidade da água
$z_f$	Profundidade local medida na malha
$z_s$	Elevação da superfície livre
$z^*$	Sistema Sigma
$t_i$	Tempo inicial
$t_f$	Tempo final
$\Delta t$	Tempo total da simulação

## Lista de Abreviaturas

ASCII	<i>American Standard Code for Information</i>
BDM	<i>Banco de Dados Meteorológicos</i>
BUFR	<i>Binary Universal Form for the Representation of meteorological data</i>
CDL	<i>network Common Data form Language</i>
CF	<i>Climate and Forecast</i>
CHC	<i>Canadian Hidraulic Centre</i>
CPTÉ	<i>Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAP	<i>Data Access Protocol</i>
ECMWF	<i>European Centre of Medium-Weather Forecast</i>
EOF	<i>Empirical Orthogonal Function</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GNOME	<i>General NOAA Operational Modelling Environment</i>
GPU	<i>Graphics Processing Unit</i>
GRIB	<i>GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form</i>
GTS	<i>Global Telecommunication System</i>
GWVis	<i>Ground-Water Visualization application</i>
HDF	<i>Hierarchical Data Format</i>
HYCOM	<i>HYbrid Coordinate Ocean Model</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
INPE	<i>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais</i>
JSON	<i>JavaScript Object Notation</i>
LANSD	<i>Laboratório de Análise Numérica e Sistemas Dinâmicos</i>
MEF	<i>Método dos Elementos Finitos</i>
MICOM	<i>Miami Coordinate Ocean Model</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NetCDF	<i>Network Common Data Form</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
OOFe	<i>Operational Ocean Forecast Python Engine</i>
OpenDAP	<i>Open-source Project for a Network Data Access Protocol</i>
PCSSB	<i>Plataforma Continental Sul-Sudeste do Brasil</i>
PSD	<i>Physical Sciences Division</i>
PySHEMAT	<i>Biblioteca Python para o Simulador SHEMAT</i>
PyTOUGH	<i>Biblioteca Python para o Simulador TOUGH2</i>
ROMS	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
RTOFS	<i>Real Time Ocean Forecast System</i>
SHEMAT	<i>Simulator of HEat and MAss Transport</i>
SSA	<i>Singular Spectrum Analysis</i>
TOUGH2	<i>Simulador Numérico de Fluidos Multifásicos</i>
UNESCO	<i>Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura</i>
XML	<i>Extensible Markup Language</i>



# INTRODUÇÃO

## 1.1 Alguns aspectos importantes da Oceanografia

A UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) se refere à Oceanografia como uma ciência universal, que tem por objetivo o estudo do meio marinho, sua flora, sua fauna e seus limites físicos com a terra firme e a atmosfera. Sendo considerada como o estudo científico dos oceanos, objetiva uma maior compreensão dos mesmos, visando maximizar a exatidão nas previsões comportamentais e fomentar o conhecimento de diversas áreas afins. Ela também pode ser considerada como inter e multidisciplinar, visto seu envolvimento com áreas como: Meteorologia, Cartografia, Engenharia e Sensoriamento Remoto (Kampel, 2002).

A oceanografia física tem o objetivo compreender, descrever e analisar processos físicos. No interior do oceano e através das suas fronteiras ocorrem processos que devem ser estudados em várias escalas espaciais e temporais como: correntes marinhas, ondas e marés. Um fator importante para o controle das correntes marinhas é a influência dos ventos que proporciona grandes transferências de energia da atmosfera para o oceano. A combinação dos efeitos integrados da circulação atmosférica e oceânica gera um fenômeno conhecido como ciclo hidrológico que tem como forçante principal a radiação solar (Relvas, 2015).

A transferência de energia da atmosfera para o oceano, através do vento e radiação solar, aliada aos gradientes de densidade presentes nos oceanos, os quais variam de

acordo com a salinidade e temperatura da água em diferentes profundidades, geram a movimentação horizontal e vertical nos oceanos (Stewart, 2008). Sendo assim, o entendimento destas forçantes é imprescindível para o conhecimento das massas de água e, conseqüentemente, da movimentação dos oceanos (Tomczak e Godfrey, 2003).

Muitos aspectos relacionados ao clima e à meteorologia são influenciados pelo oceano, e vice-versa. A exemplo da radiação solar incidindo sobre o mar, que exerce forte influência na redistribuição das correntes, vidas marinhas, e variações na temperatura, a absorção de gases pode atrasar ou reduzir o impacto do aquecimento global em decorrência do dióxido de carbono proveniente da queima de combustíveis fósseis (Kampel, 2002).

Outro fator que decorre da intervenção solar, é a variação da salinidade da água através da adição e remoção de água doce, por meio da evaporação e transições gelo-água nas regiões polares. É importante ressaltar que a temperatura e a salinidade são fatores principais para o controle da densidade da água do mar e de processos de larga escala espacial e longas escalas temporais (Relvas, 2015).

O Brasil tem um papel importante na oceanografia o qual abrange 7.367 km de zona costeira (IBGE, 2015). O oceano Atlântico possui uma função relevante no sistema climático do planeta, devido ao fluxo de calor entre a Antártida e a região equatorial. No entorno da região costeira brasileira, a corrente mais importante é a Corrente do Brasil, que é uma corrente de contorno oeste associada ao giro subtropical do Atlântico Sul. Esta, ocorre nas camadas superficiais até o nível da termoclina, que é a região onde sobrevêm as maiores variações verticais no campo de temperatura (Cirano et al., 2006).

Em áreas litorâneas do sudeste e do sul do Brasil ocorre, periodicamente, um fenômeno chamado de ressurgência costeira (Rossi-Wongtschowski e Madureira, 2006). Este, refere-se ao movimento de massas de água frias e ricas em nutrientes provindas de regiões profundas do oceano em direção à superfície. Isto provoca grandes alterações hidrográficas e nas comunidades biológicas, de forma que a realização de previsões é importante devido às suas diversas influências na vida marinha (Schmiegelow, 2004).

Dentre os inúmeros fatores importantes que podem ser levantados para o estudo oceanográfico, é possível citar aqueles referentes aos impactos ambientais, de forma

que as correntes oceânicas e ventos na superfície do mar influenciam diretamente no transporte e destino de um poluente derramado no oceano. Em situações como esta, impactos catastróficos e efeitos devastadores sobre a vida marinha devem ser levados em consideração.

O tipo de poluente, a geomorfologia da região, correntes oceânicas, temperatura e salinidade, são elementos que devem ser analisados com atenção para a avaliação de riscos, segurança e planejamento de contingência, como parte do quadro de apoio à decisão (Marta-Almeida et al., 2013). Tipicamente é utilizado um modelo numérico para monitorar e prever o comportamento e o destino de uma pluma de contaminantes, como o óleo, após um acidente que envolva derramamento no oceano (Hackett e Ichikawa, 2009).

A descoberta de petróleo em águas oceânicas no território brasileiro aparece como uma solução a diversos problemas econômicos do país. Entretanto, estas operações no oceano exigem altos investimentos, complexidade elevada, consideração de questões logísticas, tecnológicas, mão de obra específica e, conseqüentemente, maior risco ambiental. Extensos estudos simulando derramamentos de óleo ao longo da costa brasileira devem ser realizados, com o intuito de prever e mitigar possíveis danos ambientais que podem ser associados ao vazamento de óleo em poços de perfuração ou mesmo durante o transporte por navios petroleiros (Marta-Almeida et al., 2013).

O aumento das emissões de gás carbônico no mundo tem preocupado principalmente instituições ligadas à área ambiental. É notório que uma parte desta poluição é absorvida pelos oceanos e que isto tem influência direta na saturação da água e até em circulações oceânicas. Realizar comparativos entre dados coletados no passado com os atuais é fundamental para poder entender as mudanças climáticas e nos preparar melhor para o futuro.

Informações ligadas à navegação, pesca, vida marinha, previsão de furacões e, até na exploração do petróleo, são fatores indispensáveis na tomada de decisões pelas autoridades de cada país. Produzir e disponibilizar dados em tempo real para análises e previsões em escalas globais e/ou regionais são importantes para todas as nações (Blower et al., 2009). Se algo de errado puder ser previsto com antecedência, planos de contingência podem ser colocados em prática, minimizando assim possíveis impactos negativos.

Fatores como a circulação atmosférica, correntes oceânicas e a própria possibilidade de espalhamento de óleo no mar, são componentes fundamentais a serem considerados nas simulações. Em decorrência desta preocupação, há a necessidade de se disponibilizar dados geofísicos mundialmente de forma interoperável com os sistemas regionais (oceânicos) e sub-regionais (específicos para área de um país), obedecendo um padrão tecnológico em comum entre todas as nações (Hackett e Ichikawa, 2009).

Outro ponto essencial a ser considerado, está relacionado à utilização de fontes limpas e renováveis de energia, como a das ondas do mar e correntes marítimas. Atualmente, há um interesse de diversos países em buscar fontes alternativas de energia que causam menos impacto ao meio ambiente. Também deve-se levar em consideração a escassez das reservas petrolíferas e a priorização em preservar recursos ambientais regionais.

Estudos apontam que a energia global das ondas correspondem a  $8 \times 10^6$  TWh por ano, o que equivale aproximadamente a 100 vezes a geração hidrelétrica total do planeta. Se fosse gerada a mesma capacidade de energia provinda de combustíveis fósseis, resultaria uma emissão de  $2 \times 10^6$  toneladas de  $\text{CO}_2$  na atmosfera (Rodrigues, 2008). Neste sentido, conversores tem sido usados em algumas regiões do mundo visando captar a energia que o oceano produz (Bollmann et al., 2010).

No Brasil, a Plataforma Continental do Sul do Brasil, localizada entre as Bacias de Pelotas e de Santos, é tida como uma área favorável à instalação de turbinas hidrocinéticas, capazes de converter a energia das correntes oceânicas em energia elétrica, e podendo gerar com apenas um conjunto de 6 turbinas, cerca de 5 GW por ano de potência (Kirinus e Marques, 2015), (Pezzato et al., 2015), (Marques et al., 2012).

Assim, modelos numéricos que contemplam a circulação oceânica, são imprescindíveis para realizar simulações que indiquem ou não a viabilidade da implantação de conversores em determinado local (Kirinus et al., 2012). Segundo estes autores, a costa brasileira possui um potencial energético marítimo que pode ser melhor explorado, se tornando assim mais uma opção de fonte de energia inesgotável e ecologicamente correta.

Também é possível levar em consideração atividades de lazer ou econômicas que envolvem as ondas, como navegação à vela, esportes aquáticos e operações portuárias,

as quais exigem o conhecimento detalhado do campo de ondas no tempo e no espaço. Logo, a identificação da melhor localização e horário para a prática destas atividades, se torna essencial (Cuchiara et al., 2009).

## 1.2 Dados Oceanográficos

Uma grande quantidade de dados oceanográficos coletados no passado, tem papel fundamental nos estudos atuais, pois estes são utilizados na alimentação de modelos numéricos que são aplicados para estudos em múltiplas escalas de tempo e espaço (IQuOD, 2015). A coleta dos dados ocorre através de instrumentos oceanográficos, como: embarcações de pesquisas, boias e sondas ou sensores remotos orbitais e não orbitais.

Ao utilizar recursos computacionais, o sensoriamento remoto e a modelagem numérica são beneficiados com a expansão do entendimento do oceano. A visualização e a análise de um grande volume de dados relacionados à atmosfera e aos oceanos não é uma tarefa fácil. Todavia, em se tratando de questões ambientais, modelos oceânicos em escala regional e global são fundamentais no que se referem aos estudos mais diversos (Gaither e Moorhead, 2002).

Na oceanografia, diversas variáveis físicas como: salinidade, temperatura e velocidades das correntes podem ser obtidos através de coleta de dados (Silva, 2006). Assim, instituições ambientais como a NOAA, utilizam estes dados para criar modelos numéricos e disponibilizar os resultados publicamente na internet. Vale salientar que, estes modelos são processados e, com isso, é concebido um grande volume de dados ao longo do tempo.

Neste sentido, um fator muito importante no desenvolvimento do conhecimento relacionado à circulação oceânica e outros aspectos associados, é a utilização de resultados gerados por simulações numéricas. Isto se deve graças ao baixo custo operacional, uma vez que os computadores além de serem cada vez mais velozes, estão mais acessíveis. Esta configuração gera a possibilidade de se estudar, de forma rápida, áreas geográficas extensas e que, provavelmente, não poderiam ser cobertas no âmbito de um cruzeiro oceanográfico (Cirano et al., 2006), ou através de medições com instrumentos oceanográficos.

Trabalhar com dados oceanográficos disponíveis, de forma fácil e eficiente, é um dos desafios que se pretende aprimorar (Hackett e Ichikawa, 2009). Com a utilização dos meios tecnológicos existentes atualmente, e a adoção de um padrão de comunicação comum, vem sendo gerado o incentivo de realizar uma prática mais colaborativa entre as comunidades oceanográficas. Esta, permitirá que os pesquisadores possam trocar informações sobre suas pesquisas, previsões, análises e resultados encontrados (Moises et al., 2006).

## 1.3 ESTADO DA ARTE

O crescimento em pesquisas na área oceanográfica tem levado ao surgimento de algumas ferramentas que objetivam auxiliar a comunidade científica nos seus estudos. Conforme mencionado anteriormente, realizar simulações a partir de modelos oceanográficos que retratem a realidade é fundamental no que diz respeito a diagnosticar possíveis tendências, problemas e seu comportamento. Ao longo deste estudo, foram identificados algumas ferramentas oceanográficas atuais, as quais serão apresentadas a seguir.

### 1.3.1 OOF $\epsilon$ - *Operational Ocean Forecast Python Engine*

O OOF $\epsilon$  é uma ferramenta computacional livre, *open-source*, que tem por objetivo prever a rota a ser percorrida por um possível derramamento de óleo (Marta-Almeida et al., 2013) ou outro tipo de poluente em alguma região do oceano. Os resultados obtidos são validados no modelo GNOME (*General NOAA Operational Modelling Environment*), que também trata da previsibilidade de rotas que podem seguir algum tipo de poluente. No OOF $\epsilon$  é utilizado o modelo oceânico ROMS (*Regional Ocean Modeling System*) como ferramenta auxiliar de modelagem computacional.

O diferencial desta ferramenta é a possibilidade de recuperar parte dos dados de modelos disponíveis na web para realizar simulações em modo de previsão. Além disso, a mesma se incube de tratar os dados de modelos como HYCOM e GFS (*Global Forecast System*) (Mayerle et al., 2015), de modo que representem de forma adequada o comportamento oceânico em uma determinada região. A linguagem de programação

utilizada é o Python, além do protocolo OpenDAP (*Open-source Project for a Network Data Access Protocol*) para a recuperação dos dados, que também aceitam formatos de dados do tipo GRID<sup>1</sup>, HDF (*Hierarchical Data Format*), e NetCDF (*Network Common Data Form*) (Marta-Almeida et al., 2013).

### 1.3.2 GWVis - *Ground-Water Visualization Application*

Quando há a necessidade de se trabalhar com um grande volume de dados científicos, é fundamental o uso de um software que permita manipular estes dados na forma menos dispendiosa. O GWVis é uma ferramenta que permite visualizar os resultados de um modelo em diferentes perspectivas, inserir dados sobre as simulações e fazer um comparativo com outro. Esta ferramenta realiza análises através de gráficos do fluxo de águas subterrâneas em até 3 dimensões (Best e Lewis, 2010).

O software utiliza uma implementação da linguagem Python conhecida como pyOpenGL. Esta ferramenta possibilita o desenvolvimento de programas que necessitem de alta qualidade e desempenho na construção da interface e geração de gráficos do projeto. O programa se destaca pela qualidade das imagens produzidas, cores, mudanças das informações conforme a profundidade do mar, simplicidade no fornecimento da informação, geração de imagens animadas e visualização panorâmica na área de interesse (Best e Lewis, 2010).

### 1.3.3 Scripts em Python para os simuladores SHEMAT e TOUGH2

Uma outra forma de desenvolver soluções tecnológicas para atender, por exemplo, a área ambiental, é utilizando um tipo de programação baseada em *scripts*. Este tipo de implementação é realizada a partir de programas simples, em uma linguagem de programação que não impeça o programador de fazer alterações, de modo que o código possa ser adaptado para atender a todas as necessidades exigidas.

Neste caso, Wellmann et al. (2012) apresentaram uma solução tecnológica através de *scripts* para o controle de simulações subsuperficiais, aplicados nos simuladores

---

<sup>1</sup>Recurso gráfico que permite visualizar dados de forma tabular.

SHEMAT (*Simulator of HEat and MAss Transport*) e TOUGH2<sup>2</sup> na análise de fluídos e fluxo de calor abaixo do nível do mar. A linguagem de programação Python foi adotada pelos autores, os quais citam que foram desenvolvidas duas bibliotecas nomeadas PySHEMAT<sup>3</sup> e PyTOUGH<sup>4</sup>.

Estas bibliotecas visam atender aos simuladores em questão, de modo que permitam realizar configurações de forma simples, tais como: definição da variável que será utilizada, níveis de refinamento da resolução que se encontra o dado, conjunto de dados que serão utilizados nas simulações e etc.

### 1.3.4 Metview

No Brasil, o projeto que mais se assemelha ao proposto neste trabalho, é o software Metview. Desenvolvido de forma colaborativa entre o CPTE/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o ECMWF (*European Centre of Medium-Weather Forecast*). O Metview é uma ferramenta livre para manipulação e visualização de dados meteorológicos. Esta, utiliza como fonte de dados o BDM (Banco de Dados Meteorológicos) do INPE, do qual faz uso dos dados provindos do GTS (*Global Telecommunication System*), armazenando-os de forma eficiente em seus servidores.

A ferramenta se destaca pela eficiência na velocidade de recuperação dos dados do BDM. Além disso, permite a visualização e manipulação dos dados na forma de mapas e gráficos, fornecendo aos usuários um acompanhamento melhor de eventos meteorológicos e apoio na validação de modelos numéricos de previsão do tempo. Outro fator importante, está relacionado à *interface* interativa com o usuário, de modo que permite melhor usabilidade da ferramenta e fácil acesso aos dados através de formulários descomplicados (de Almeida et al., 2001).

Possui como características:

---

<sup>2</sup>TOUGH2 é um programa de simulação numérica para os fluxos não isotérmicos de multicomponentes, fluidos multifásicos em meios porosos e fraturados.

<sup>3</sup>PySHEMAT é uma biblioteca desenvolvida na linguagem Python que trata dados de entrada e saída do simulador SHEMAT.

<sup>4</sup>PyTOUGH é uma biblioteca desenvolvida na linguagem Python que trata dados de entrada e saída do simulador TOUGH2.



- Leitura dos dados nos formatos: GRIB (*GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form*), BUFR (*Binary Universal Form for the Representation of meteorological data*), NetCDF e ASCII (*American Standard Code for Information*);
- *Interface* simples e interativa;
- Visualizações de mapas em várias projeções;
- Filtragem de dados para a região em estudo;
- A partir do resultado da filtragem das observações, é possível realizar várias operações matemáticas;
- Plotagem de diversos tipos gráficos.

## 1.4 JUSTIFICATIVA

A Oceanografia é a área de estudo que contempla todo o conhecimento referente aos processos físicos, químicos, geológicos e biológicos dos oceanos. Hoje em dia, satélites e computadores potentes estão sendo utilizados como instrumentos principais na coleta e produção de dados oceanográficos. Com isso, os especialistas em oceanografia, podem realizar um estudo mais amplo dos oceanos e da forma como ele interage com os continentes, a atmosfera e, conseqüentemente, com os habitantes da Terra (Schmiegelow, 2004).

Através de instrumentos oceanográficos (Figura 1.1), tais como: navios oceanográficos, plataformas, barcos, boias, ou até mesmo pela utilização de torres de observação, aviões e satélites, é possível realizar a coleta de dados em variados intervalos de tempo. Estes dados são representados por variáveis como: salinidade, temperatura, velocidades das correntes, pH, propagação do som, dentre outras. A partir destas informações, simulações numéricas podem ser realizadas, de modo que permitem reproduzir ou prever o comportamento do oceano por meio de modelos numéricos (Silva, 2006).

É importante ressaltar que, estes modelos trabalham com um volume significativo de dados científicos e que estão na forma de matrizes. Quando estes dados são representados como função do tempo, latitude, longitude e profundidade, seu tamanho se

torna ainda maior. Neste caso, os dados podem ser apresentados em quatro dimensões, que também são conhecidos como cubo ou dados gradeados (Signell et al., 2008).

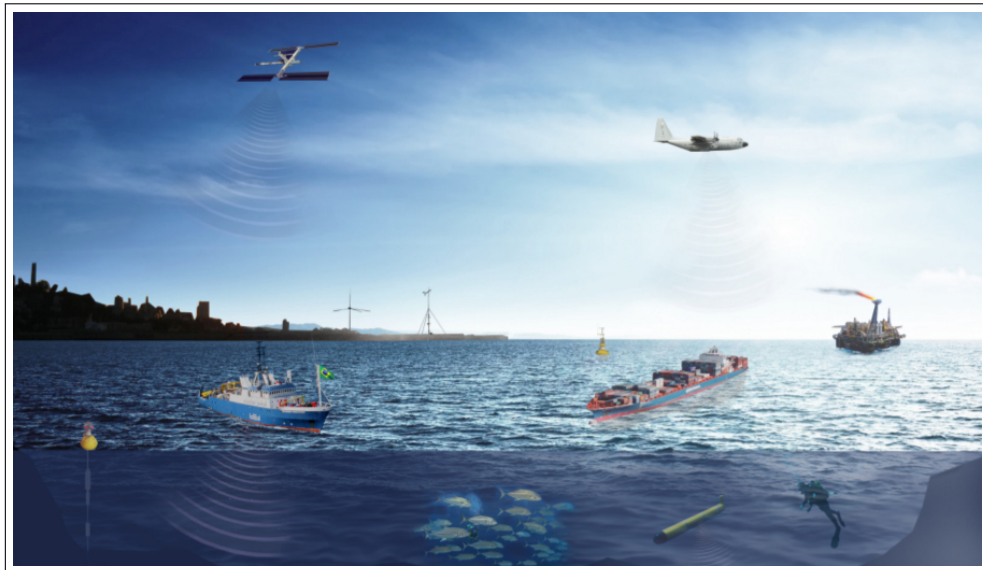


Figura 1.1: Instrumentos Oceanográficos (Silva, 2014)

Com o surgimento de computadores de alto desempenho a partir da década de 70, a modelagem numérica dos oceanos se tornou possível através da utilização de domínios que subdividiam o volume ocupado da água (Colling, 2001). A partir desta situação, diferentes soluções e análise de cenários, puderam ser utilizadas na simulação oceânica com o intuito de fornecer maior exatidão às análises e previsões sobre a dinâmica dos oceanos.

Desde então, esforços têm sido realizados para otimizar a visualização de dados oceanográficos. Porém, o maior desafio tem sido encontrar um método ou conjunto de métodos que melhor represente o significado destes dados, ou mesmo, o melhor tratamento destas variáveis para o seu uso científico (Gaither e Moorhead, 2002). Segundo Miller et al. (2013), é importante que profissionais em computação, matemáticos e os próprios pesquisadores, trabalhem de forma colaborativa, visando a criação de uma solução elegante e eficiente para atender aos problemas encontrados no dia a dia. Também devem ser adotados padrões e métodos mais adequados de modo que sirvam não só para as atuais ferramentas computacionais, mas também para novas tecnologias.

A utilização de modelos globais e regionais são as principais etapas na área da modelagem computacional oceanográfica. Dados obtidos a partir da observação de sensores remotos orbitais, radares e boias marítimas são utilizadas como condições

iniciais e de contorno para o modelos de abrangência global. Os resultados destes modelos, quando pós-processados, são indispensáveis para a utilização como condições iniciais e de contorno em modelos regionais. Geralmente, os modelos regionais são utilizados, e seu pós-processamento e visualização são realizados em ferramentas de análise de dados (Moises et al., 2006).

Atualmente, a computação de alto desempenho tem permitido aprimorar os modelos numéricos, tornando seus resultados mais detalhados, melhorando a qualidade dos processos internos e parâmetros, além da execução de simulações em períodos mais longos. Contudo, os conjuntos de dados produzidos em pesquisas podem se tornar muito complexos e que variam de dezenas de megabytes a gigabytes (Signell et al., 2008).

É importante ainda ressaltar as diferentes localidades, a infra-estrutura onde estes dados estão armazenados e o formato de arquivo que cada um disponibiliza. Com isso, ocorre a necessidade de utilização de um mecanismo fácil, rápido e eficiente para realizar os estudos e o pré-tratamento aos dados ambientais que estão disponíveis publicamente em escala global. Desta forma, as simulações numéricas podem ser realizadas de maneira mais rápida e cooperativa para o avanço das pesquisas na área oceanográfica (Moises et al., 2006).

O baixo custo associado à computação de alto desempenho e à evolução da modelagem numérica oceanográfica, estão permitindo o desenvolvimento na área de simulação e previsão oceânica. Modelos numéricos realísticos e que envolvem múltiplos processos podem ser executados diariamente. Atualmente, a comunidade científica é capaz de investigar processos em escalas espaciais e temporais impensadas nas décadas passadas (Marta-Almeida et al., 2011).

Contudo, grandes arquivos de dados e a necessidade do conhecimento computacional em um nível avançado, torna esta tarefa não trivial. Neste sentido, estruturas de pré-tratamento de dados e simulações automatizadas, assim como, ferramentas para armazenamento, plotagem e visualização de resultados, são alguns dos itens indispensáveis para a otimização das pesquisas (Marta-Almeida et al., 2011).

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 Objetivo Geral

Devido à necessidade da utilização de dados de modelos globais para a inicializar e forçar um modelo regional de circulação oceânica, o presente trabalho tem como objetivo principal, desenvolver rotinas computacionais que permitam o acesso, a realização de um pré-tratamento e visualização de resultados, a partir de modelos globais.

### 1.5.2 Objetivos Específicos

- Obtenção/leitura dos dados de modelos de circulação oceânica e de circulação atmosférica globais;
- Desenvolver uma estrutura de tratamento de dados dos modelos globais de modo que, problemas relacionados a baixa resolução e ausência de dados sejam contornados, visando atender de forma adequada a modelos regionais.
- Desenvolver uma estrutura de preparação de condições iniciais e de contorno para um modelo regional;
- Realizar um estudo de caso considerando uma simulação hidrodinâmica na PCSSB (Plataforma Continental Sul-Sudeste do Brasil).

## Capítulo 2

# METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido através da utilização de dados de modelos globais de circulação atmosférica e oceânica, os quais foram aplicados como condições iniciais e de contorno para um modelo de circulação oceânica regional. Como estudo de caso, foram obtidas variáveis de interesse em determinada região da PCSSB, abrangendo um período de tempo de 10 dias. A estrutura de fluxo de dados e visualização dos resultados foram construídas utilizando a linguagem de programação Python.

Em relação à codificação, foi adotada uma forma mais flexível de implementação de programas conhecida como *scripts*. Segundo Wellmann et al. (2012), *scripts* são programas simples, desenvolvidos em uma linguagem de programação de alto nível, que automatizam grande parte do pré-processamento, controle e pós-processamento. Além disso, ao utilizar este padrão de desenvolvimento, o usuário não se limita a pré-requisitos específicos de uma ferramenta já pronta, e que nem sempre atinge o potencial máximo esperado da simulação. Assim, os mesmos podem ser adaptados e reutilizados conforme a necessidade. Neste trabalho, foi convencionada a nomenclatura rotina computacional, visando aporuguesar a palavra em inglês *scripts*.

Construído a partir do paradigma de programação procedural, as rotinas foram desenvolvidas em Python por possuir uma vasta lista de bibliotecas que atendem à área computacional científica. Esta tecnologia é comumente utilizada na área oceanográfica, pois permite a correta preparação dos arquivos de entrada, segundo as necessidades do modelo que foi utilizado para as simulações. Logo, parâmetros essenciais como a malha computacional, condições iniciais e de contorno, puderam ser desenvolvidos de

forma adequada para o modelo ambiental escolhido.

## 2.1 Dados globais de circulação oceânica

Os dados de circulação oceânica foram obtidos a partir do modelo de circulação HYCOM. Este, é um modelo de circulação global do oceano que surgiu a partir do MICOM (*Miami Coordinate Ocean Model*). O modelo resolve as equações primitivas de movimento do oceano e equações de transporte de traçadores ativos.

Uma característica deste modelo numérico é relacionada à utilização de três tipos de sistemas de coordenadas verticais (Figura 2.1): isopicnais - níveis de densidade constante - no interior do oceano; coordenadas sigma - frações da profundidade local - no talude e plataforma continental; e coordenadas cartesianas  $z$  na camada de mistura e nas regiões mais rasas, próximas à costa (de Carvalho, 2014). Com a combinação destes sistemas de coordenadas, é possível obter resultados mais realísticos nas simulações dos fenômenos oceânicos tanto em regiões oceânicas quanto em regiões mais rasas (Wallcraft et al., 2007).

Em se tratando de fluidos oceânicos, um dos aspectos mais importantes está relacionado à determinação do movimento das águas e do transporte lateral (da Rocha Frago, 2004). Um modelo hidrodinâmico que permita a simulação do movimento do oceano em diferentes escalas de tempo e espaço é uma tarefa difícil, de forma que esta função está relacionada à capacidade de processamento computacional e à imprecisão de alguns processos físicos, como por exemplo, os processos turbulentos (Assad et al., 2009).

Além de atender a escalas espaciais e temporais a nível global de forma precisa e atualizada, o modelo HYCOM fornece uma excelente representação de processos de mistura desde a superfície até as camadas profundas do oceano. A análise destes processos de mistura verticais são de extrema importância, pois influenciam na distribuição de propriedades associadas à circulação oceânica (Halliwell, 2002).

O modelo HYCOM permite o acesso em tempo real a dados de simulação e previsão globais do oceano. Simulações oceânicas são geradas diariamente na *Navy DoD*

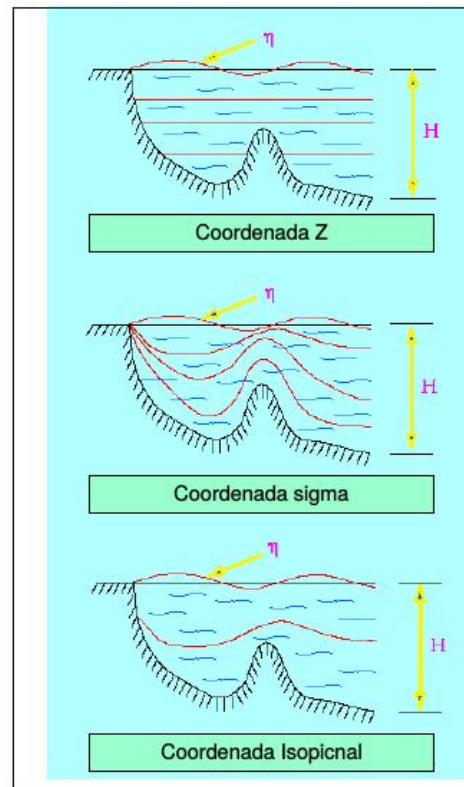


Figura 2.1: Coordenadas Verticais (Assad et al., 2009)

*Supercomputing Resource Center*<sup>1</sup> e, ao serem concluídas, são copiadas para os servidores do HYCOM, onde são realizados os processamentos finais. Assim, os dados ficam disponíveis 48 h após terem sido obtidos (HYCOM, 2015).

São obtidos diariamente 100 GB de dados, contando também quatro dias de dados passados (*hindcast*), uma análise e uma previsão (*forecast*) de 5 dias. Após esta etapa, os dados do modelo são convertidos para o formato NetCDF. Seguindo o CF (*Climate and Forecast*), o padrão de metadados oceanográficos, é disponibilizado em um servidor DAP (*Data Access Protocol*), permitindo que usuários obtenham subconjuntos de dados sem a necessidade de requisitar um ou mais arquivos completos (Cornillon et al., 2009).

O site oficial do HYCOM<sup>2</sup> informa que os dados estão no formato NetCDF. Além disso, disponibiliza um link<sup>3</sup> no qual lista uma série de ferramentas tecnológicas as quais permitem requisitar os dados de um servidor que esteja localizado remotamente.

<sup>1</sup>[www.navo.hpc.mil/](http://www.navo.hpc.mil/)

<sup>2</sup><https://hycom.org/dataserver>

<sup>3</sup>[http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/using\\_dods.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/using_dods.html)

## 2.2 Dados globais de circulação atmosférica

O NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research*) *Reanalysis 1* é um centro de estudos atmosféricos que disponibiliza resultados da reanálise de dados atmosféricos e que tem por objetivo compreender os processos físicos da Terra e aprimorar previsões de tempo e clima em escalas globais, regionais, de curto a longo prazos.

A integração entre o Laboratório de Pesquisas do Sistema Terrestre - ESRL (*Earth System Research Laboratory*) e a Divisão Científica Física - PSD (*Physical Sciences Division*) da NOAA, permite que ambas as áreas explorem de forma produtiva fatores relacionados não só ao tempo e o clima, mas também ao desenvolvimento das melhores técnicas de observação, assimilação de dados e modelos de previsões (ESRL, 2015).

O sistema de disponibilização de dados é atualizado diariamente (4 vezes por dia), e gera dados que são armazenados em arquivos no formato NetCDF, separados por meses, atendendo a 17 níveis de pressão atmosférica, 28 níveis sigma e contemplando dados desde o ano de 1948 até o presente (Reanalysis, 2015).

A reanálise é um método que utiliza um grande conjunto de dados observacionais de muitas fontes para formar um processo de modelagem que produz uma melhor estimativa temporal e espacialmente contínua, em nível global ou regional, de inúmeros parâmetros atmosféricos, terrestres e oceanográficos. Os resultados das reanálises incluem diversas variáveis em vários níveis da atmosfera.

Suas escalas globais apresentam resolução espacial de  $0,5^\circ$  a  $2,5^\circ$  e temporal de 1 à 6 h (Douglas, 2011). As variáveis são agrupadas em 3 classes. Variáveis do tipo A: temperaturas do ar, vento de rotação e geopotencial. Geralmente são fortemente influenciadas pelas observações disponíveis e são, portanto, o mais confiável produto da reanálise. Variáveis do tipo B: variáveis de umidade, divergente do vento e parâmetros de superfície. São influenciados tanto pelas observações e pelo modelo e são, portanto, menos confiáveis. Variáveis de tipo C: fluxos de superfície, taxas de aquecimento e precipitação. São completamente determinadas pelo modelo e estão sujeitas à restrição da assimilação de outras observações (Kistler et al., 2001).

Através de modelos gerais de circulação é possível realizar projeções das con-



dições climáticas futuras. Dados geofísicos como precipitação, temperatura, vento e umidade são fundamentais para melhor entendimento sobre o aquecimento global que vem ocorrendo no planeta. Através de modelos atmosféricos como o NCEP/NCAR Reanalysis 1 é possível realizar simulações e obter resultados que permitem prever desastres ambientais iminentes (Douglas, 2011).

Assim como os dados oceanográficos, os referentes à circulação atmosférica também podem ser acessados. A partir de diversos sites de instituições ambientais, como por exemplo a NOAA<sup>4</sup>, é possível selecionar um conjunto menor de dados que seja do interesse para que possam ser feitas simulações que atendam aos estudos realizados.

É importante ressaltar que modelos atmosféricos como o Reanalysis podem trabalhar em conjunto com os modelos oceânicos, pois ambos apresentam bom acoplamento entre eles (Trenberth e Caron, 2001).

## 2.3 Modelo hidrodinâmico - TELEMAC3D

O estudo de caso deste trabalho será realizado com a utilização do sistema de modelagem numérica TELEMAC desenvolvido dentro do consórcio Telemac-Mascaret e disponível<sup>5</sup> livremente, através do módulo hidrodinâmico TELEMAC3D. Este módulo é utilizado para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica tridimensional de fluxos com superfície livre em rios, estuários, regiões costeiras e/ou oceânicas (Kirinus et al., 2012).

O sistema TELEMAC é formado por um conjunto de módulos, em duas e/ou três dimensões, para o estudo de aspectos relacionados à hidrodinâmica, transporte de sedimentos, ondas e qualidade de água das regiões costeiras e oceânicas. O TELEMAC3D é o módulo do sistema TELEMAC que resolve as equações de Navier-Stokes utilizando o método de elementos finitos para a discretização espacial e discretização vertical em coordenadas sigma, de forma a acompanhar os limites superficiais e de fundo (Hervouet e Van Haren, 1996).

O MEF (Método dos Elementos Finitos) é considerado um dos mais adequados

---

<sup>4</sup><http://www.esrl.noaa.gov/psd/thredds/catalog/Datasets/catalog.html>

<sup>5</sup><http://www.opentelemac.org>

para estudar um sistema composto por diferentes compartimentos com uma região costeira adjacente de morfologia e topografia complexa, pois permite uma melhor representação dos acentuados gradientes batimétricos, a discretização detalhada da linha de costa, a aplicação de refinamento diferenciado dentro da grade numérica, e a otimização do tempo computacional (Hervouet, 2007). Assim, o MEF é utilizado no TELEMAC3D visando discretizar de forma adequada a região que se pretende estudar.

Os principais resultados obtidos em cada ponto da malha computacional são a velocidade nas três direções e a concentração de quantidades transportadas, enquanto o principal resultado da malha na camada superficial é a elevação da superfície livre (Hervouet, 2007). Este modelo pode ser aplicado para estudos de ambientes marinhos e/ou estuarinos, e leva em conta a influência de efeitos como (Desombre, 2013):

- Influência da temperatura e salinidade;
- Fricção de fundo;
- Influência da força de Coriolis;
- Influência de condições meteorológicas: precipitação, pressão atmosférica e ventos;
- Consideração de trocas de calor com a atmosfera;
- Fontes e sumidouros de fluido e/ou quantidade de movimento dentro do domínio;
- Modelos de turbulência simplificados ou mais complexos (comprimento de mistura, k-epsilon ou k-omega);
- Zonas secas dentro do domínio;
- Transporte de traçadores e difusão pelas correntes com a criação ou desaparecimento de termos.

Para que o modelo funcione, é necessário fornecer as condições iniciais e de contorno na forma de forçantes oceânicas e atmosféricas, tais como: salinidade, temperatura, velocidade de corrente, elevação da superfície livre, pressão atmosférica, intensidade e direção dos ventos e temperatura do ar, de acordo com os estudos de: Kirinus et al. (2015), Pezzato et al. (2015), Tavora et al. (2014), Stringari et al. (2012), Kirinus e Marques (2012), Marques et al. (2011), Marques et al. (2010), Marques et al. (2009).

### 2.3.1 Equacionamento do modelo

A equação da continuidade e a equação de conservação de quantidade de movimento são derivadas das relações da dinâmica dos fluidos geofísicos, e representadas em um sistema de coordenadas cartesianas. No módulo tridimensional, o modelo TELEMAC3D considera as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq para as equações de Navier-Stokes.

A aproximação hidrostática considera a simplificação dos termos da velocidade vertical  $w$  que possuem pequenas escalas, desprezando assim a difusão, os termos fonte e a aceleração na vertical. Portanto, os termos que consideram as variações da pressão hidrostática e da gravidade são mantidos na equação vertical de quantidade de movimento, de forma que, a pressão em um ponto depende apenas da pressão atmosférica na superfície e do peso da coluna de água sobre a partícula.

A aproximação de Boussinesq considera que a diferença na densidade ( $\Delta\rho$ ) em relação a um valor de referência ( $\rho_0$ ) é supostamente pequena. Desta forma, como a equação do estado relaciona a densidade do fluido com a concentração dos traçadores na massa de água, é possível definir a sua influência nas equações hidrodinâmicas.

Neste sentido, é possível criar um conjunto de equações de Navier-Stokes hidrostáticas, que são utilizadas pelo TELEMAC3D para o cálculo da profundidade da água e das componentes da velocidade de corrente em cada ponto do domínio computacional.

Considerando que a densidade do fluido é denotada por  $\rho$ , a pressão por  $p$  e o vetor velocidade  $(u, v, w)$ , podemos escrever a equação da continuidade e as equações da conservação da quantidade de movimento em coordenadas cartesianas como:

Equação da continuidade:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla^2(vu) + F_x \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial u} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla^2(vv) + F_y \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial u} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nabla^2(vw) + F_z \quad (2.4)$$

Equação da pressão hidrostática:

$$p = \rho_0 g(S - z) + \rho_0 g \int_z^s \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \quad (2.5)$$

## Termo fonte das equações do momento

### *Fricção com o fundo*

No fundo, a tensão de cisalhamento atuando no fluido se opõe a velocidade de corrente e pode se descrita como:

$$\vec{\tau} = -\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} \quad (2.6)$$

O conhecimento desta tensão é possível a partir do conhecimento do comportamento do fluxo. Modelos de turbulência podem fornecer esta estimativa, baseado no conhecimento da velocidade de corrente próximo ao fundo. Através de uma análise dimensional, obtemos a seguinte equação para representar a tensão de cisalhamento como:

$$\vec{\tau} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.7)$$

Considerando, as unidades dadas em  $kgm^{-1}s^{-2}$ , em que  $C_f$  é um coeficiente de fricção adimensional. Por definição, esta equação, a qual serve para a determinação da tensão de cisalhamento é baseada na hipótese de que é obtido longe o suficiente da barreira sólida. Desta forma, juntando as equações anteriores, obtemos:

$$v \frac{\partial \vec{u}}{\partial n} = -\frac{1}{2} \rho C_f \sqrt{u^2 + v^2} \vec{u} \quad (2.8)$$

A tensão  $\nu \frac{\partial \vec{u}}{\partial n}$  é obtida na formulação variacional dos termos de difusão em elementos finitos. Portanto, qualquer modelo de turbulência irá fornecer uma fórmula para a estimativa desta tensão baseada no conhecimento da rugosidade do fundo e do fluxo na vizinhança da barreira sólida.

Frequentemente, os modelos de turbulência fornecem a expressão para o cisalhamento de velocidade ou o coeficiente de arrasto. Assim, existe uma série de fórmulas para a estimativa do coeficiente de arrasto que podem ser usadas pelo modelo TELEMAC3D, dentre elas, a fórmula de Manning, utilizada neste trabalho.

$$C_f = \frac{2gm^2}{h^{1/3}} \quad (2.9)$$

Em que:  $m$  é o coeficiente de Manning e  $h$  é a profundidade da água.

### *Influência do vento*

A influência dos ventos é considerada no modelo como uma condição bidimensional no contorno superficial. A tensão de cisalhamento gerada pelo vento pode então ser descrita segundo a equação abaixo:

$$\nu \frac{\partial \vec{u}_H}{\partial n} = \frac{\rho_{ar}}{\rho} a_{vento} \vec{W} \cdot k\vec{W} \quad (2.10)$$

Assim descrevemos: a densidade do ar  $\rho_{ar} = 1,29 \text{kgm}^{-3}$ ,  $\vec{u}_H$  como a velocidade na superfície do domínio,  $\vec{W}$  sendo a intensidade do vento e  $k\vec{W}$  o módulo da mesma. O coeficiente da influência do vento  $a_{vento}$  (adimensional) é dado por Flather (Flather, 1976) como:

$$a_{vento} = 0.656 \times 10^{-3}$$

se

$$k\vec{W} \leq 5 \text{m/s}$$

$$a_{vento} = (-0.12 + 0.137k\vec{W}) \times 10^{-3}$$

se

$$5m/s \leq k\vec{W}k \leq 19.22m/s$$

e

$$a_{vento} = 2.513 \times 10^{-3}$$

se

$$k\vec{W}k \geq 19.22m/s$$

É importante ressaltar que a influência do vento é um fenômeno complexo que depende da rugosidade da superfície livre, da intensidade do vento e da distância na qual a observação é feita a partir da superfície.

### ***Força de Coriolis***

Esta força é levada em consideração pelo fato de a Terra ser um referencial não inercial. Ela aparece devido ao movimento de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, de forma que, a mesma é somada às equações do movimento em referenciais inerciais. A força de Coriolis em uma certa latitude ( $\phi$ ) é dada por:

$$F_x = 2\omega v \sin\phi = fv \quad (2.11)$$

$$F_y = -2\omega u \sin\phi = -fu \quad (2.12)$$

### ***Trocas de calor***

A potência térmica liberada para a atmosfera por unidade de área  $P$  é supostamente proporcional a  $T - T_{ar}$ , sendo  $T$  a temperatura da água na superfície e  $T_{ar}$  a temperatura do ar. Desta forma, definimos através de conceitos termodinâmicos que:

$$P = A(T - T_{ar}) \quad (2.13)$$

Em que,  $A$  é o coeficiente de troca de calor em  $Wm^{-2} \text{ } ^\circ C^{-1}$ . Portanto, o fluxo de

calor pode ser escrito por:

$$\phi = -\rho C_p \partial_T \vec{\nabla} \cdot \vec{n} = -\rho C_p \partial_T \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.14)$$

Considerando o coeficiente de difusão de calor na água  $C_p = 4.18 \text{Kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ . Pelo agrupamento das duas equações podemos obter as equações das condições de contorno:

$$v_T \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{A}{\rho C_p} (T - T_{ar}) \quad (2.15)$$

O coeficiente  $A$  inclui fenômenos como a radiação, convecção do ar em contato com a água e o calor latente produzido pela evaporação da água. Sweers (Sweers, 1976) expressa o coeficiente  $A$  de acordo com a temperatura da água  $T$  e a velocidade do vento  $W$  (em  $m/s$ ) medida no ponto, como:

$$A = (4.48 + 0.0049T) + 2021.5b(1 + W)(1.12 + 0.018T + 0.0015T^2) \quad (2.16)$$

O parâmetro  $b$  varia de acordo com a localização. Seu valor médio para o Atlântico é de 0.0025, e seu valor máximo é encontrado no Mediterrâneo, alcançando 0.0035.

### *Termos de flutuabilidade e pressão atmosférica*

Os termos do gradiente de pressão atmosférica e os termos de flutuabilidade que aparecem nos termos do gradiente de pressão são integrados com os termos fonte, de forma que, são relativos aos eixos  $Ox$  e  $Oy$ :

$$-\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial x} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial x} - g \frac{\partial}{\partial x} \left[ \int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz' \right] \quad (2.17)$$

$$-\frac{1}{\rho_o} \left(1 - \frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial \rho_{atm}}{\partial y} + g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_o}\right) \frac{\partial Z_s}{\partial y} - g \frac{\partial}{\partial y} \left[ \int_Z^{Z_s} \frac{\Delta\rho}{\rho_o} dz' \right] \quad (2.18)$$

A salinidade é expressa em  $\text{kgm}^{-3}$  e a temperatura  $T$  em  $^\circ\text{C}$ . A utilização destes traçadores possibilita o cálculo de variações na densidade para os termos de flutuabilidade. O modelo TELEMAC3D considera algumas possibilidades de cálculo de

densidade no modelo incorporando os efeitos dos traçadores em conjunto ou separadamente através de equações simplificadas. A densidade da água pode então ser calculada como função da temperatura e da salinidade.

### *Modelo de turbulência*

A modelagem de processos turbulentos é um delicado problema que o TELEMAC consegue resolver através de vários métodos. O método escolhido para este trabalho é o de comprimento de mistura para jatos de flutuabilidade. Este modelo apresenta uma formulação simples e foi exclusivamente desenvolvida para a modelagem de plumas em regiões costeiras de maneira bastante satisfatória. Modificado por Rodi (Rodi, 1984), é capaz de estimar a escala de comprimento da mistura, sendo o comprimento de mistura e um ponto proporcional a meia-altura do local.

Para maiores informações sobre o equacionamento do modelo TELEMAC3D e aplicações para a região de estudo, consultar Marques (Marques et al., 2009) e Hervouet (Hervouet e Van Haren, 1996).

## **2.4 Geração da Grade de Elementos Finitos**

A utilização de grades batimétricas não estruturadas (com elementos triangulares) permite uma boa representação das características batimétricas e morfológicas na grade do modelo numérico. Este tipo de grade otimiza a simulação, permitindo representar com resolução adequada as regiões de morfologia complexa, como por exemplo, a região da ilha de Florianópolis e a zona costeira adjacente.

A qualidade dos resultados calculados pelo modelo está diretamente relacionada aos dados batimétricos utilizados para a geração da grade numérica. Desta forma, para obter a melhor representação possível das características batimétricas da região costeira adjacente, foi necessário combinar dados batimétricos de diferentes fontes.



## 2.5 Linguagem de Programação Python

Python é uma linguagem de programação de alto nível (uma linguagem com um nível de abstração relativamente elevado, longe do código de máquina e mais próximo à linguagem humana). Contando com algumas bibliotecas adequadas para atender de forma rápida e precisa a uma gama considerável de cálculos. Esta característica torna esta linguagem científica bastante eficiente (Oliphant, 2007).

Sendo uma linguagem interpretada com sintaxe comparada a pseudocódigo, sua curva de aprendizado é alta e aprazível. Isto é um fator importante, visto que cientistas costumam ter que escrever programas computacionais não triviais e, geralmente, utilizam um grande volume de dados para realizar testes e provar seus experimentos.

Instituições de pesquisa, tais como a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), NOAA, Unidata, tem adotado a linguagem Python como ferramenta fundamental no desenvolvimento de aplicativos que atendam a seus experimentos por possuir uma sintaxe descomplicada, uma variedade de bibliotecas poderosas que atendem de forma rápida e clara às necessidades que lhe são requisitadas (Oliphant, 2007).

Tecnologias que atendam não só ao tratamento de dados numéricos científicos, mas também de alto desempenho e usabilidade são primordiais na área científica. O Python é uma linguagem de programação que vem se desenvolvendo rapidamente e sendo, cada vez mais, adotada e aprimorada pela comunidade científica e engenheiros, fornecendo soluções tecnológicas voltadas para a área ambiental (Pérez F., 2011).

O que realmente torna o Python uma linguagem científica são módulos como o Numpy e o Scipy. Estes, dão suporte a matrizes grandes e multidimensionais, números complexos e de pontos flutuantes, operações matemáticas de vários níveis de complexidade, provendo resultados de forma rápida e precisa. Outra característica importante é a possibilidade de se estender a programas ou bibliotecas de linguagens poderosas, como C, C++ (Cython) e Fortran (F2Py) (Pérez F., 2011).

Com uma vasta lista de bibliotecas disponíveis gratuitamente na internet, a área da oceanografia é uma das que vem se beneficiando com esta opção, apresentando soluções que permitem manipular formatos científicos de armazenamento de dados,

como o HDF5, NetCDF e possuindo até mesmo sites que recomendam e demonstram exemplos, como: *Institute of Marine Research*<sup>6</sup>, *Oceanpython*<sup>7</sup>, *Pypi Python*<sup>8</sup> (Pérez F., 2011).

Além disso, fatores como: manuais, apostilas, dicas e boas práticas de programação são supridas na internet, o baixo custo de novas opções de hardware, acesso a modelos oceanográficos livremente, suporte online através de uma forte e presente comunidade de programadores em Python, permitem o incentivo e crescimento de adeptos a esta linguagem (Pérez F., 2011).

Caso sejam necessárias manipulações de recursos de baixo nível, tais como rotinas relacionadas a controladores de dispositivos, ou até mesmo a utilização de algum módulo que já tenha sido construído com tecnologias diferentes, o Python permite a ligação com estas outras linguagens, fazendo proveito de códigos já prontos e que funcionam corretamente.

A Unidata, instituição de educação e pesquisa geocientífica, criadora do padrão NetCDF, reconhece que o Python é uma linguagem de programação de propósito geral que foi abraçado pela comunidade das ciências da terra para a análise, visualização e exploração de dados. Inclusive, a mesma cita que profissionais da área de geociências tem substituído coleções de ferramentas de software e outras linguagens que lidam com as solicitações remotas de dados, estatísticas, análise e visualização por soluções Python (Unidata, 2015).

Abaixo são relacionadas algumas características do Python.

- Possui licença livre de código aberto, no qual é permitido ao programador Python vender, usar ou distribuir livremente programas desenvolvidos por ele;
- Apresenta um moderno mecanismo de tratamento de erros e exceções;
- Possui uma sintaxe limpa e de fácil interpretação, no qual influencia na produtividade, reaproveitamento de código e ágil manutenção;
- Suporta programação procedural e orientada a objetos;

---

<sup>6</sup><http://www.imr.no/~bjorn/python/links.html>

<sup>7</sup><http://oceanpython.org/>

<sup>8</sup><https://pypi.python.org/pypi/oceans>

- Através de um poderoso interpretador, permite programar e testar imediatamente, evitando etapas demoradas de compilação do código e atrasos no processo de desenvolvimento;
- Possui uma forma eficiente de acesso e reutilização de código com o uso de módulos;
- Implementa uma coleta de lixo automático, ou seja, não é necessário se preocupar com o gerenciamento (alocação/liberação) de memória;
- Apresenta um grande número de módulos de bibliotecas (ambos instalados na biblioteca padrão e através de downloads adicionais);
- Dispõe de uma comunidade famosa por oferecer listas de discussão com informações úteis, dicas, notícias e respostas a dúvidas;
- Possui, na internet, um repositório com uma lista de módulos (bibliotecas<sup>9</sup>) em Python para atender a diversas finalidades;
- Provê recursos otimizados para atender a longas listas de dados, com gerenciamento de memória e rápidas respostas nas requisições;
- Suporta grandes listas multidimensionais, efetuando cálculos de forma rápida e precisa;
- Possui integração com outras linguagens<sup>10</sup> como C, C++, Fortran, Java entre outras;
- Trabalha com diversos formatos de dados, incluindo binários, NetCDF, HDF5, XML (*Extensible Markup Language*), JSON (*JavaScript Object Notation*) e etc;
- Permite computação paralela sobre GPUs (*Graphics Processing Unit*), clusters, multinúcleos CPUs (*Central Processing Unit*);
- Fornece a possibilidade de desenvolver programas de alto desempenho multiusuários e multitarefas;
- Admite programar para ambientes *desktop* (PyQT), *web* (Django) e *mobile* (Kivy).

---

<sup>9</sup>[www.python.org/pypi](http://www.python.org/pypi)

<sup>10</sup><https://wiki.python.org/moin/IntegratingPythonWithOtherLanguages>

Geralmente, os modelos numéricos oceanográficos possuem um grande volume de dados, no qual necessitam de análises computacionais rápidas e exatas. Padrões de estruturas de dados, como o NetCDF, HDF e o GRIB, suporte a tecnologias, como OPeNDAP, plotagem/visualização de gráficos, análise e manipulação de dados são imprescindíveis nas pesquisas oceanográficas (Marta-Almeida et al., 2011). Visando atender estas necessidades, e conforme as vantagens citadas, a linguagem Python vem como uma alternativa eficiente e promissora na área de computação científica (Hackett e Ichikawa, 2009).

## 2.6 O formato de dados NetCDF

O NetCDF é uma interface que fornece uma biblioteca de funções de acesso aos dados que são armazenados na forma de matrizes. Desenvolvido pela Unidata, comunidade formada por instituições de educação e pesquisa, que tem como objetivo o compartilhamento de dados geocientíficos e ferramentas para o acesso e visualização deste tipo de dado.

Adotada pela comunidade oceanográfica, o NetCDF fornece um formato de arquivo binário não restrito a uma plataforma específica. Suporta matrizes enormes e que podem conter uma variedade de tipos de dados, provindas a partir de medições *in situ* ou de grandes redes multidimensionais de modelos numéricos.

Uma das principais características deste formato é que ele é auto-descritivo (metadado) (WOCE, 2015). Neste caso, são fornecidas informações descritivas sobre os dados que ali estão contidos. Também podem ser citadas como características do arquivo NetCDF:

- Permite criar, acessar e compartilhar dados multidimensionais;
- Possui poderosa compactação dos dados e a capacidade de acessar um pequeno subconjunto dos mesmos sem precisar descompactar todo o arquivo;
- Fornece um formato independente de máquina (sistema operacional e plataforma 32 ou 64 bits);

- Pacotes de softwares científicos livres (Python, C, C++, Fortran) ou pagos (Matlab) podem ler diretamente os dados de determinada estrutura, variável, metadado e unidades (WOCE, 2015);
- Muitas organizações, incluindo grande parte da comunidade climática, contam com o padrão de acesso a dados NetCDF para armazenamento de dados, (vide: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/usage.html>) (Galiano et al., 2010);
- Suporta diversos tipos de variáveis comumente necessárias para dados científicos: escalares e matrizes de *bytes*, caracteres, números inteiros e números de ponto flutuante (Galiano et al., 2010);
- Arquivos NetCDF contém três propriedades: dimensões, variáveis e atributos. Dimensões são usadas para descrever propriedades específicas como tempo (data, hora, minuto, segundo), elevação (nível na coluna vertical d'água) e posição espacial (área/localização - latitude e longitude) (Figura 2.2). Variáveis possuem um nome, tipo de dado e forma (listas). Elas são o centro dos dados do arquivo NetCDF, e são representadas por matrizes multi-dimensionais de valores homogêneos. Atributos fornecem metadados que descrevem as variáveis no arquivo para ajudar no processamento e análise (Malensek et al., 2013);
- São considerados portáteis e acessíveis, pois vinculam os dados numa forma interativa e que possam ser acessada por sistemas computacionais em diferentes arquiteturas;
- Possibilita acessar partes dos dados sem ter que ler o arquivo inteiro (Rädler et al., 2012).

A estrutura do arquivo NetCDF é formada por dimensões, variáveis e atributos. Estes componentes são usados juntos para capturar os dados e identificar seu significado na matriz. O arquivo é dividido basicamente em duas áreas: cabeçalho e a parte de dados. O cabeçalho contém informações sobre as dimensões, variáveis e atributos. Nele é possível identificar parâmetros importantes como seus nomes, tipos de dados, unidades (metros, horas e listas de dados atrelados) e tamanho das dimensões. Já a parte dos dados é subdividida em duas. A primeira corresponde a variáveis e dimensões que abrangem, respectivamente, armazenamento e referências fixas. A segunda parte corresponde a variáveis de registros ilimitados.

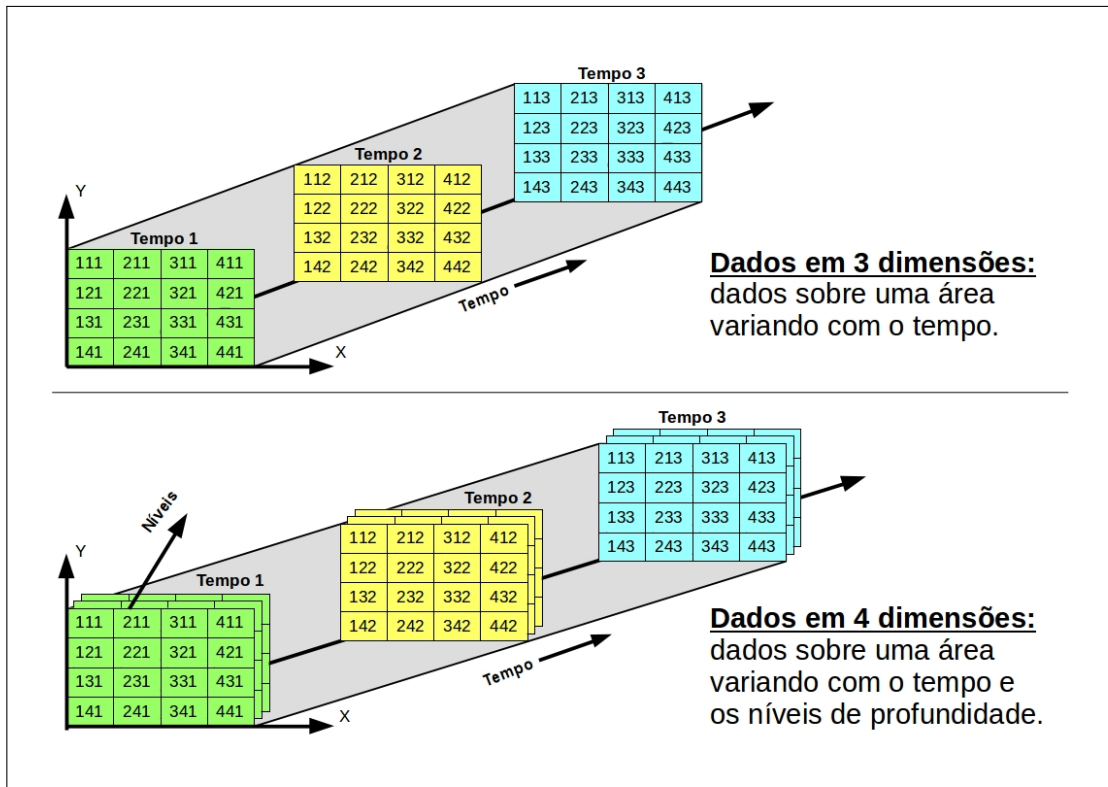


Figura 2.2: Dados multidimensionais em 3 e 4 dimensões. Adaptado de: (ArcGIS-Pro, 2015)

A notação usada para descrever o arquivo NetCDF é chamada de CDL (*network Common Data form Language*). O site <http://www.cfconventions.org> da CF (*Climate and Forecast*), provê padrões de metadados oceanográficos que definem o que cada variável contida no arquivo NetCDF representa em relação ao espaço e tempo.

Estas convenções estão voltadas para a descrição dos dados multidimensionais de modelos numéricos ou dados provindos de análises realizadas por satélites. As convenções CF estão cada vez mais ganhando aceitação e já são adotados por uma série de projetos e grupos de pesquisa como um padrão primário (Blower et al., 2009).

## 2.7 Interpolação

De acordo com Idris (2013), o método de interpolação consiste no "preenchimento de espaços" a partir de um conjunto de dados já conhecidos. A linguagem Python, mais precisamente o módulo Numpy, possui uma função `numpy.interp` que realiza a interpolação, preenchendo pontos NaNs (*Not a Number*) com valores que são mais

adequados a dar continuidade no conjunto de dados em questão.

O método de interpolação adotado neste trabalho foi o de vizinho mais próximo. Segundo Iescheck et al. (2008), para cada ponto é atribuído o valor da amostra mais próxima a este ponto. A (Figura 2.3) demonstra o seu funcionamento, onde o símbolo + indica uma amostra já existente e o símbolo \* indica os pontos que foram processados e disponibilizados para preenchimento dos espaços vazios. Neste caso, pode ser observado o símbolo \* que se encontra dentro do círculo junto ao símbolo + e que representa o vizinho mais próximo. Este é um dos pontos que serão preenchidos com o mesmo valor representado por + que está no círculo. Assim, a matriz de dados oceanográfica que se encontrava com NaNs passará a estar toda preenchida corretamente.

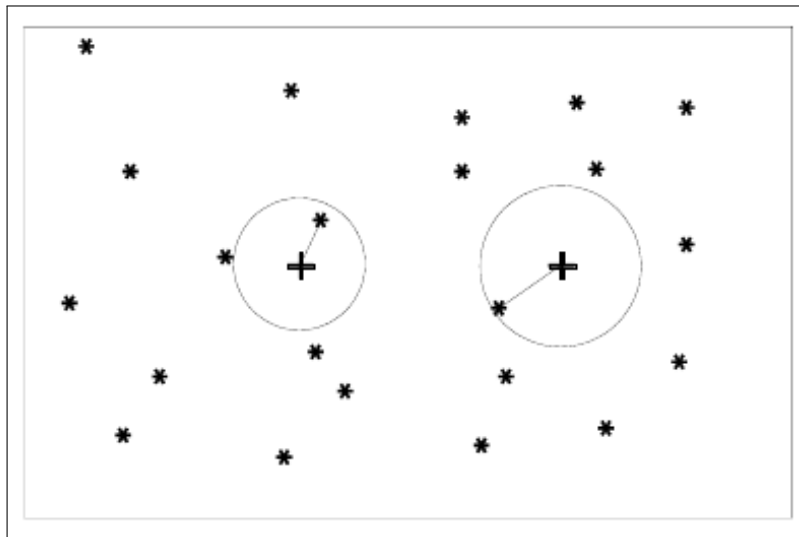


Figura 2.3: Método de interpolação de vizinho mais próximo (Namikawa, 1995)

O equacionamento do método de vizinho mais próximo é apresentado a seguir:

$$R_n = 2\bar{d} \sqrt{\frac{n}{a}}$$

Onde:

$R_n$ : representa o vizinho mais próximo.

$\bar{d}$ : a distância média observada do vizinho mais próximo.

n: o total de pontos.

a: a área total.

## 2.8 Diagramas de desenvolvimento do trabalho

A seguir, é apresentado o trabalho na forma de diagramas. Inicialmente, tem-se o quadro geral (Figura 2.4), onde é possível observar o desenvolvimento do trabalho como um todo e, na área pontilhada em vermelho, a parte que foi desenvolvida.

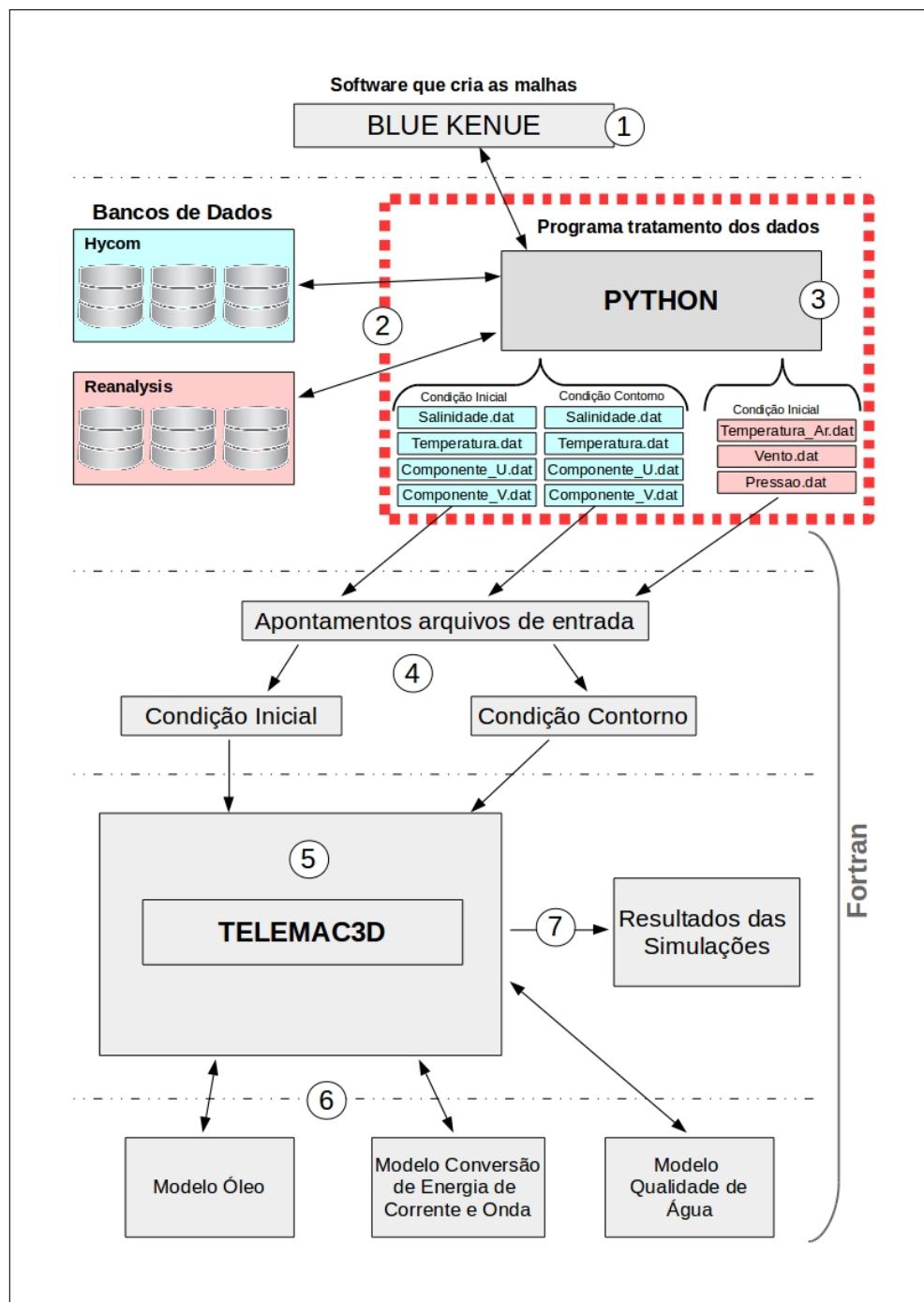


Figura 2.4: Diagrama Geral



As etapas são enumeradas e cada processo é descrito abaixo:

1. É criada a malha computacional da região de estudo através do software BlueKenue;
2. As rotinas desenvolvidas na linguagem Python utilizam os arquivos de contorno e de malha gerados pelo BlueKenue como referência para a região de estudo. Além disso, é acessado o banco de dados do LANSI, o qual detém os dados da região correspondente à malha;
3. Posteriormente, o programa realiza tratamento nos dados e gera as condições iniciais e de contorno, no formato adequado para as simulações no modelo TELEMAC3D;
4. A partir deste ponto, é utilizada a tecnologia Fortran. Nesta etapa é feito o apontamento dos arquivos que foram gerados anteriormente para fornecer de entrada ao modelo TELEMAC3D;
5. Nesta etapa são realizadas as simulações no modelo TELEMAC3D;
6. Dependendo do interesse em estudo, um submódulo conveniente pode ser utilizado nas simulações;
7. O resultado das simulações é disponibilizado ao final de todo o processo de forma que possa ser analisado.

### **2.8.1 1ª Etapa: Geração da Malha**

A partir de cartas náuticas ou dados de batimetria obtidos na internet, é possível criar a malha batimétrica da região que se pretende estudar. Para isso, é utilizado o *software* Blue Kenue. Neste software é realizada a importação dos dados citados anteriormente e, visando maior detalhamento da área em estudo, é definido o refino da região. Ao final, são gerados dois tipos de arquivos, um arquivo texto e outro binário. No arquivo texto é definida a linha de contorno da região que será estudada, onde uma parte identifica o limite oceânico e outra define a área de costa. O arquivo binário contém os pontos da malha que serão preenchidos com dados das variáveis de modelos oceânicos e atmosféricos.

O *software* BlueKenue foi desenvolvido pelo CHC (*Canadian Hydraulic Centre*), sendo recentemente agregado a lista de programas recomendados para usuários do sistema open TELEMAC-MASCARET<sup>11</sup>. Uma de suas funções é a de criação de malhas de elementos finitos, além da visualização de resultados de saída do modelo. O domínio computacional utilizado para este trabalho compreende a região que vai da cidade do Chuí no Rio Grande do Sul até o limite norte do estado do Rio de Janeiro, além de contemplar a região costeira adjacente até uma profundidade de aproximadamente 5.000 m (Figura 2.5).

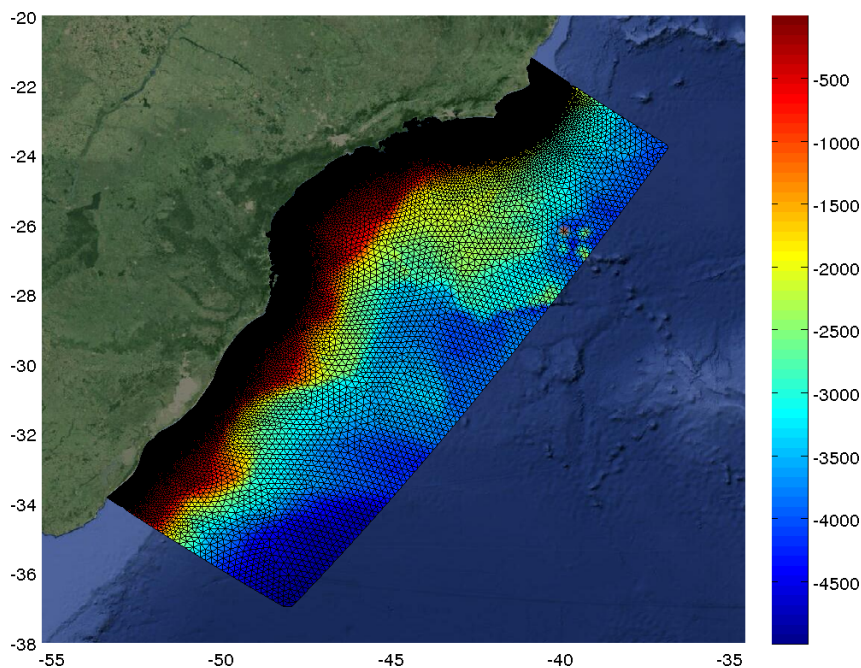


Figura 2.5: Malha numérica em elementos finitos da PCSSB. A barra de cores indica a profundidade local em metros.

As condições de contorno podem ser identificadas na (Figura 2.6), onde os pontos em verde demarcam o limite oceânico e os pontos em azul, a região costeira. Os pontos que compõem a linha oceânica vão de 1 até 519. Na linha de costa, estes pontos estão compreendidos entre 520 e 983. Os números na cor vermelha são os pontos da malha que, neste caso, possui 205.617 nós e um total 405.833 elementos.

<sup>11</sup><http://www.opentelemac.org/>

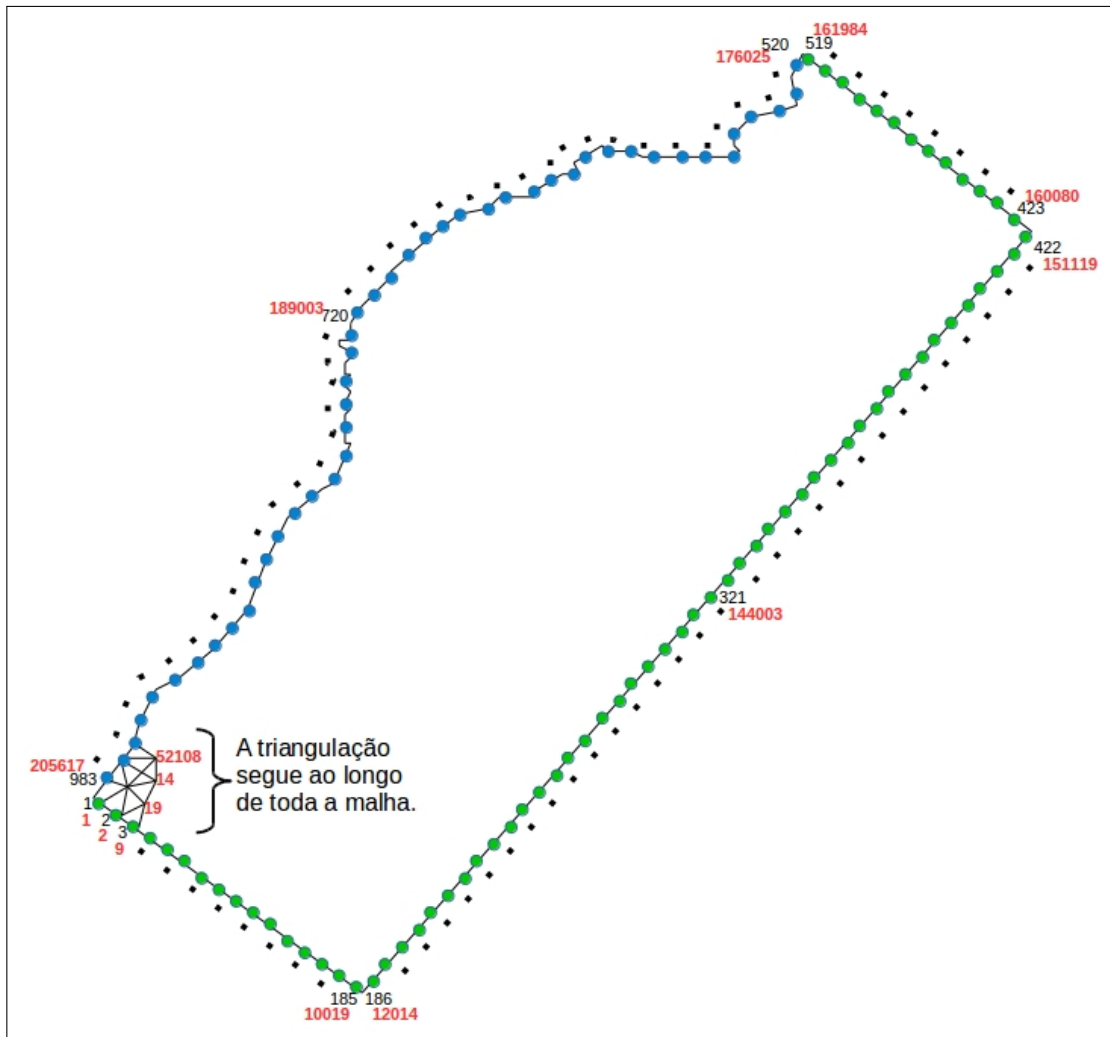


Figura 2.6: Esquema do arquivo de condições de contorno e triangulação da malha de elementos finitos.

## 2.8.2 2ª Etapa: Requisição dos Dados

Atualmente os dados dos modelos HYCOM e Reanalysis se encontram em servidores (Linux) no LANSD da FURG, organizados em pastas e subpastas. Os dados estão em arquivos no formato NetCDF. No caso dos arquivos do HYCOM, estes estão armazenados em intervalos diários. Por outro lado, os arquivos do Reanalysis estão separados por ano.

Para acessar os arquivos NetCDF, é utilizada uma biblioteca do Python chamada NetCDF4. Esta, permite que sejam lidos estes arquivos e definidos parâmetros, os quais filtram os dados por região (latitude e longitude), profundidade e tempo da variável desejada. As rotinas desenvolvidas em Python, requisitam os dados dos

servidores do LANSO, especificando os parâmetros citados anteriormente. Logo, estes dados são filtrados e devolvidos para o computador solicitante. Este processo pode ser visualizado na (Figura 2.7)

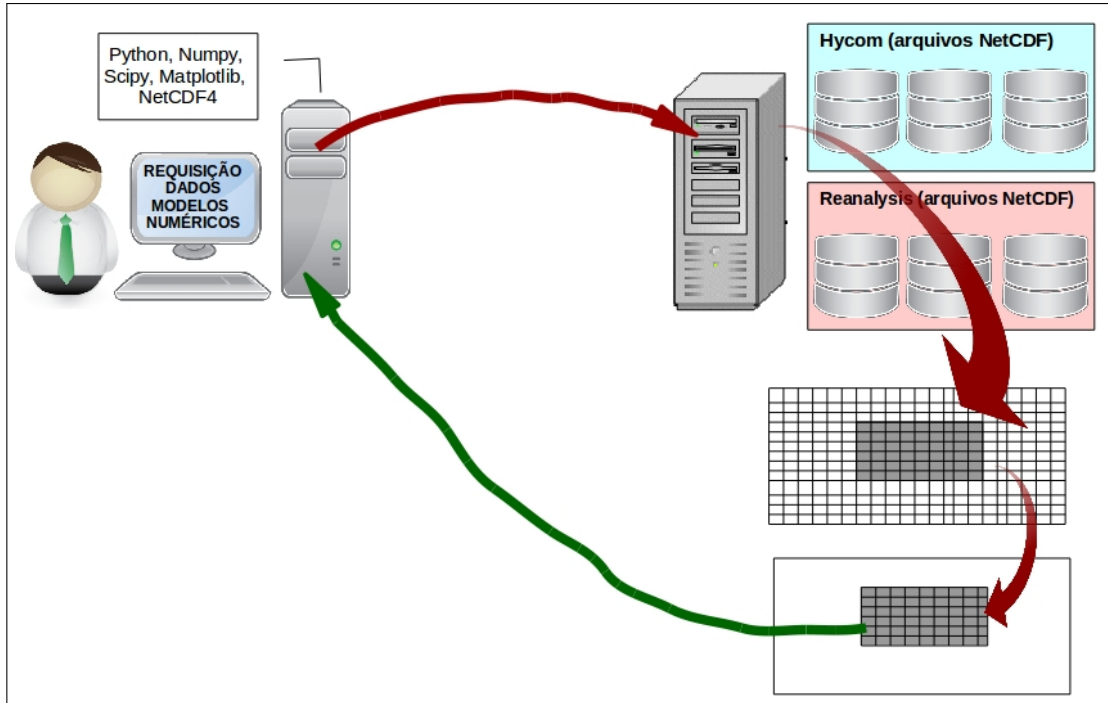


Figura 2.7: Requisição dos dados junto ao banco de dados do LANSO.

### 2.8.3 3ª Etapa: Tratamento dos Dados

Nesta etapa, após serem requisitados os dados da região de estudo, estes são aplicados a uma função que identifica o vizinho mais próximo. Esta ação é necessária, pois nem sempre os parâmetros que são fornecidos na chamada da rotina, são exatamente iguais aos disponibilizados pelo modelo. Assim, o ponto mais próximo do que foi definido na chamada do programa é filtrado nos dados do modelo e usado até o fim de sua execução.

Outro ponto importante a ser considerado, diz respeito à resolução dos dados dos modelos. Tanto os dados do HYCOM quanto os do Reanalysis, tiveram suas resoluções aumentadas entre um ponto e outro (latitude e longitude), pois o espaçamento entre eles é muito maior do que a malha que foi definida para o estudo.

Na (Figura 2.8), item (a), é possível observar que o domínio da malha do HYCOM

e do TELEMAC3D é o mesmo, porém a última tem uma resolução/refinamento maior. Também é possível verificar que mesmo com a resolução aumentada, existem pontos representados em vermelho com ausência de dados. Para solucionar este problema é necessário identificar os pontos com esta falha, realizar o tratamento e interpolação novamente, de maneira que estes elementos sejam preenchidos com dados uniformes ao longo de todo o vetor.

A (Figura 2.8), item (b), ilustra o momento em que ocorre a interpolação, preenchendo os pontos vazios (em vermelho) com os que estão sendo gerados através de uma função da linguagem Python. Com os dados preenchidos adequadamente, agora é necessário identificar quais dados correspondem aos da malha do TELEMAC3D. Para isso, é novamente utilizada a função de interpolação por vizinho mais próximo para mapear qual ponto interpolado do HYCOM se liga com o da malha do TELEMAC3D. Neste momento, o dado oceanográfico na posição mais adequada da lista do HYCOM é copiado (seta na cor verde) para o da malha do TELEMAC3D. É possível observar este último procedimento na (Figura 2.8), item (c).

No caso do HYCOM, os procedimentos também são aplicados em cada nível vertical, a partir dos dados brutos do modelo. Para realizar o mapeamento dos dados do HYCOM em uma determinada camada com o do TELEMAC3D, é utilizada como referência uma tabela de níveis verticais sigma. Esta tabela é necessária, pois as camadas do HYCOM variam em sua profundidade (nível  $z$ ) e, para este trabalho, as camadas do TELEMAC3D foram definidas em camadas de níveis sigma igualmente espaçados. Assim, a ligação entre a camada do HYCOM e do TELEMAC3D ocorre através da aplicação de uma interpolação de vizinho mais próximo, entre o nível de profundidade do TELEMAC e o nível do HYCOM.

Neste trabalho são utilizados 15 níveis sigma de profundidade para a geração de condições iniciais e de contorno, sendo que estes níveis foram distribuídos de forma a fornecer uma melhor resolução das camadas superficiais e de fundo. Com relação ao modelo atmosférico Reanalysis, foi necessário fazer procedimentos similares ao do HYCOM, exceto pela interpolação para tratar a ausência de dados e pela interpolação vertical, visto que este possui dados em todos os seus pontos e apenas a camada atmosférica mais próxima do oceano é considerada.

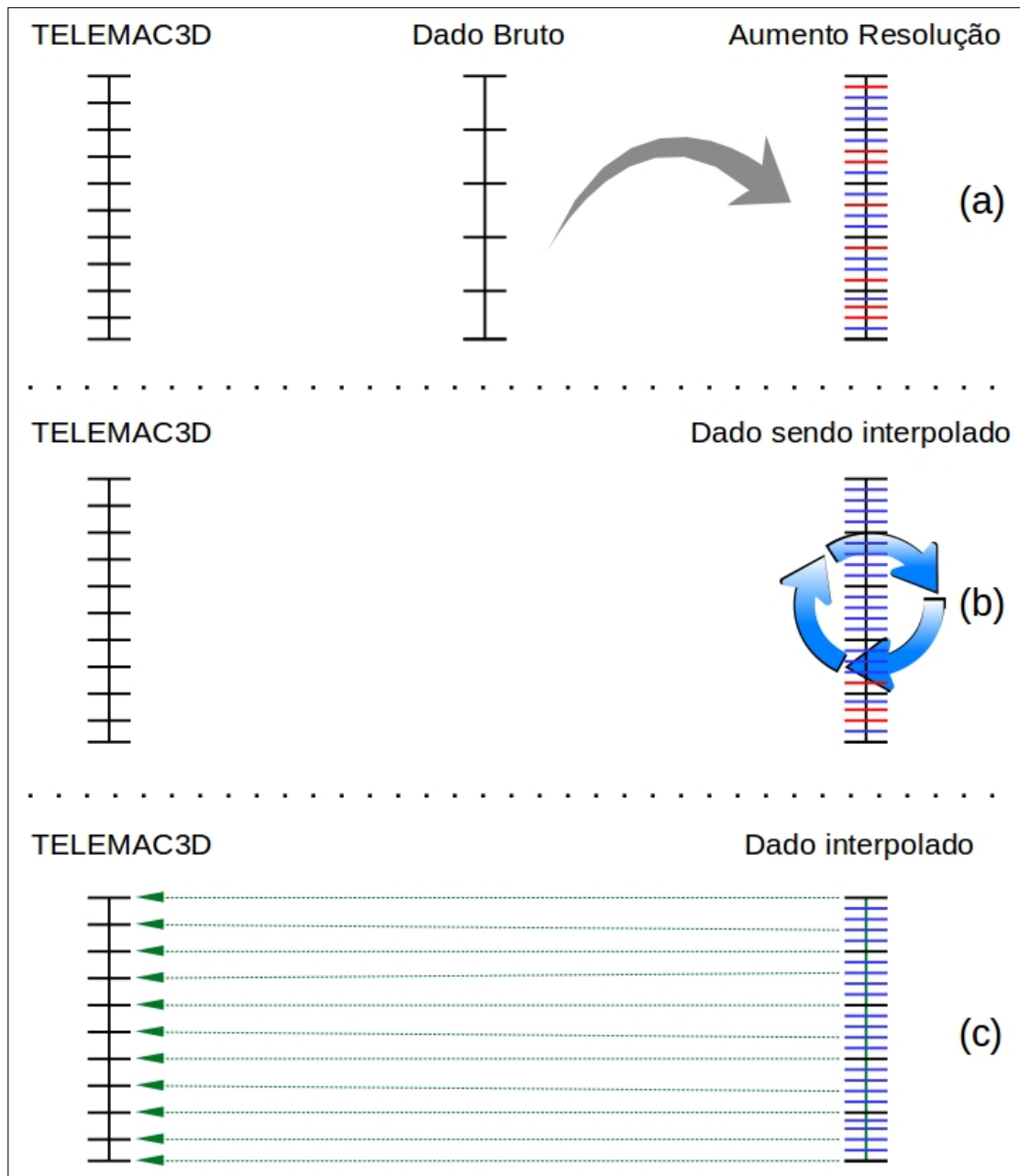


Figura 2.8: Tratamento dos Dados Oceanográficos para a malha batimétrica do modelo TELEMAC3D.

Após o processamento das rotinas citadas anteriormente, são gerados arquivos contendo as condições iniciais e de contorno para a região de estudo. Estes arquivos são necessários para realizar as simulações no TELEMAC3D. Parâmetros lidos do arquivo texto, e gerados pelo software BlueKenue, são utilizados como referência para que o TELEMAC3D possa identificar os limites da região até onde ocorrerão as simulações. O arquivo binário, também gerado pelo BlueKenue, fornecerá todos os pontos da malha do TELEMAC3D e, assim, será possível criar o arquivo de condições iniciais e de

contorno para realizar as simulações.

As variáveis de salinidade e temperatura do modelo HYCOM e as variáveis de temperatura do ar, intensidade e direção dos ventos e pressão atmosférica do programa de Reanalysis, são utilizadas no primeiro dia como condições iniciais. Por outro lado, as variáveis de intensidade e direção das correntes, salinidade e temperatura do modelo HYCOM e as variáveis de temperatura do ar, intensidade e direção dos ventos do programa de Reanalysis, são utilizadas ao longo de todos os outros dias como condições de contorno do modelo TELEMAC3D.

# Capítulo 3

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Banco de dados do Reanalysis-NOAA

A análise dos resultados será apresentada a partir das rotinas escritas em Python para o banco de dados do Reanalysis da NOAA. Nela, serão analisados os parâmetros de temperatura do ar, pressão atmosférica e a intensidade do vento representadas pelas suas componentes zonal (componente U) e meridional (componente V).

Estes dados são essenciais para a geração de condições de contornos superficiais para o modelo TELEMAC3D. Pois, para a utilização do modelo, é necessário preparar dados atmosféricos, diários ou com periodicidade de 6 em 6 horas. Estes dados devem ser prescritos em todos os nós da malha computacional durante o período de simulação.

Vale ressaltar que, a visualização destes resultados também é importante para que o usuário possa ter uma observação prévia do comportamento de cada variável. Assim, é possível verificar os dados que serão utilizados para realizar a simulação numérica.

As figuras desta seção serão apresentadas através da comparação do dado bruto proveniente do site da NOAA, em relação ao mesmo dado, posterior a utilização das rotinas de interpolação desenvolvidas neste trabalho. Além disso, será possível observar a variação destes parâmetros em dois dias selecionados (dia 5 e 6 de julho de 2014). A área escolhida para a análise compreende a região que vai do Rio da Prata, localizado no Uruguai, até o sul da Bahia, localizado na região nordeste do Brasil.



### 3.1.1 Variável Temperatura do Ar

Para a temperatura do ar (Figura 3.1), no período selecionado, houve uma variação de 278 a 294 Kelvin. Vale ressaltar que, no modelo TELEMAC3D, é feita conversão da temperatura para graus Celsius. Os tons mais azuis representam menores temperaturas e, os mais avermelhados, as maiores temperaturas.

Os dados originais do Reanalysis (Figuras 3.1 do lado esquerdo), apresentam variação espacial mais grosseira ( $2.5^\circ$  por  $2.5^\circ$ ), resultando em uma baixa resolução de dados em todo o domínio. Estas feições podem ser facilmente observadas nas (Figuras 3.1a e 3.1c), onde as regiões com maiores gradientes térmicos apresentam uma baixa resolução. Os dados interpolados apresentados nas (Figuras 3.1b e 3.1d), mostram as mesmas feições com maior suavidade, demonstrando assim, que o interpolador funcionou adequadamente.

Do ponto de vista físico, pode ser observado que os resultados obtidos representam adequadamente o campo de temperatura do ar para esta região da América do Sul, durante o inverno Austral. Assim, maiores temperaturas são observadas nas regiões sudeste, centro-oeste e nordeste do Brasil, enquanto que as menores temperaturas são observadas na região sul do país (Quadro et al., 1996).

É possível ainda verificar que a evolução temporal do campo de temperatura do ar mostra uma redução da temperatura entre os dias 5 e 6 de julho na região sul do Brasil. Este resultado sugere a passagem de uma frente fria, a qual é um processo meteorológico comum na região sul durante o inverno (Saldanha et al., 2010).

Após o tratamento dos dados, os mesmos foram aplicados sobre a malha utilizada para o estudo de caso do modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.2) mostra os dois dias utilizados anteriormente, abrangendo uma região que vai da cidade do Chuí, no Rio Grande do Sul, até o limite norte do estado do Rio de Janeiro. É possível observar uma boa suavidade no campo que representa a intensidade da temperatura do ar, mostrando assim que a interpolação funcionou de forma adequada.

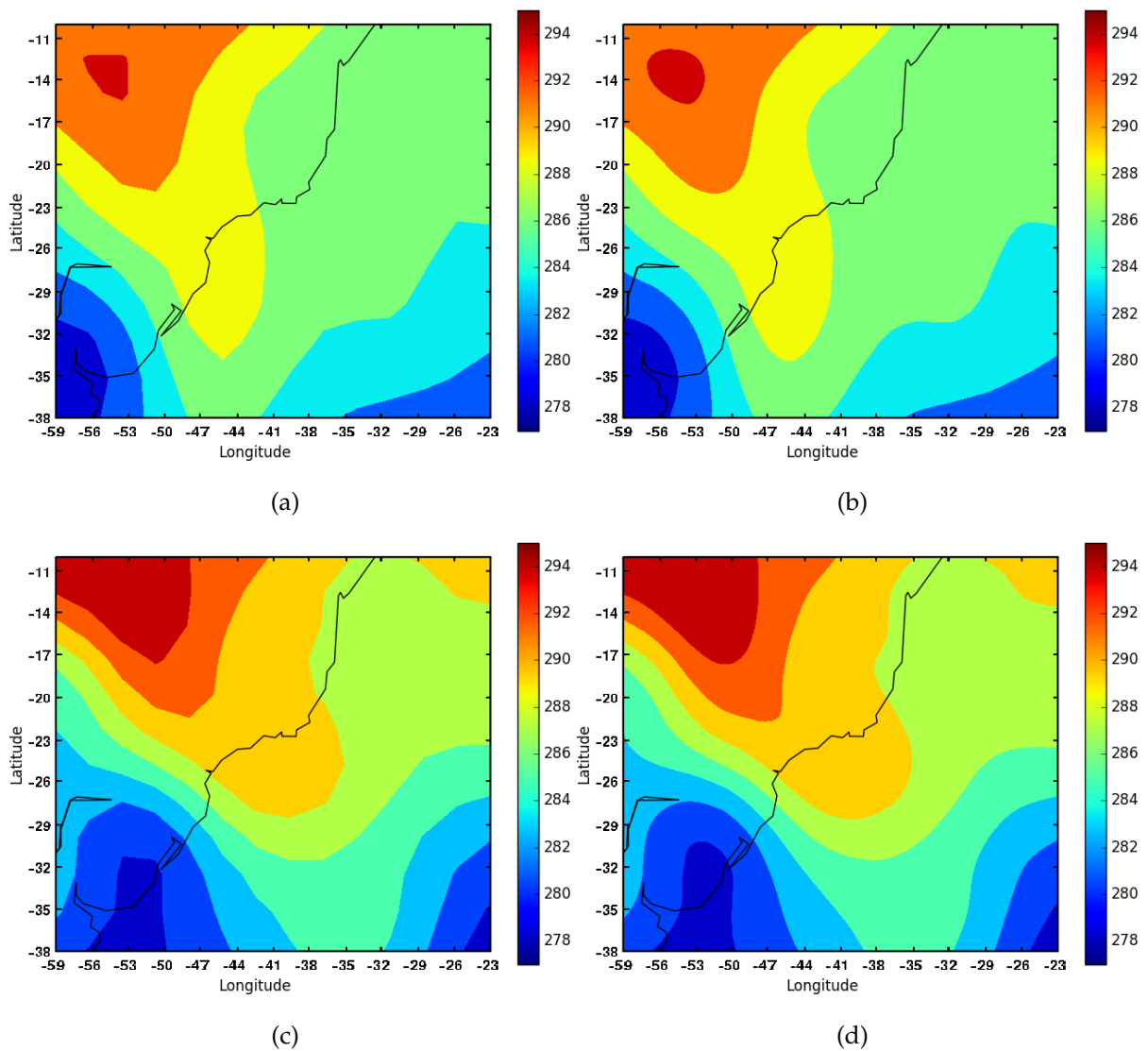


Figura 3.1: Comparação da variável temperatura do ar. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014.

É importante ressaltar que, nas (Figuras 3.2a e 3.2b), a variabilidade espacial e temporal no campo de temperatura do ar, vistas nos dados brutos do Reanalysis, é mantida nos dados que são preparados para o modelo TELEM3D.

Nestes dados pode ser observado que as maiores temperaturas ocorrem na zona costeira da região sudeste do Brasil, e conforme o tempo vai evoluindo entre os dias 5 e 6 de julho, as temperaturas vão diminuindo na zona costeira da região sul do Brasil, sugerindo a passagem de uma frente fria pela região.

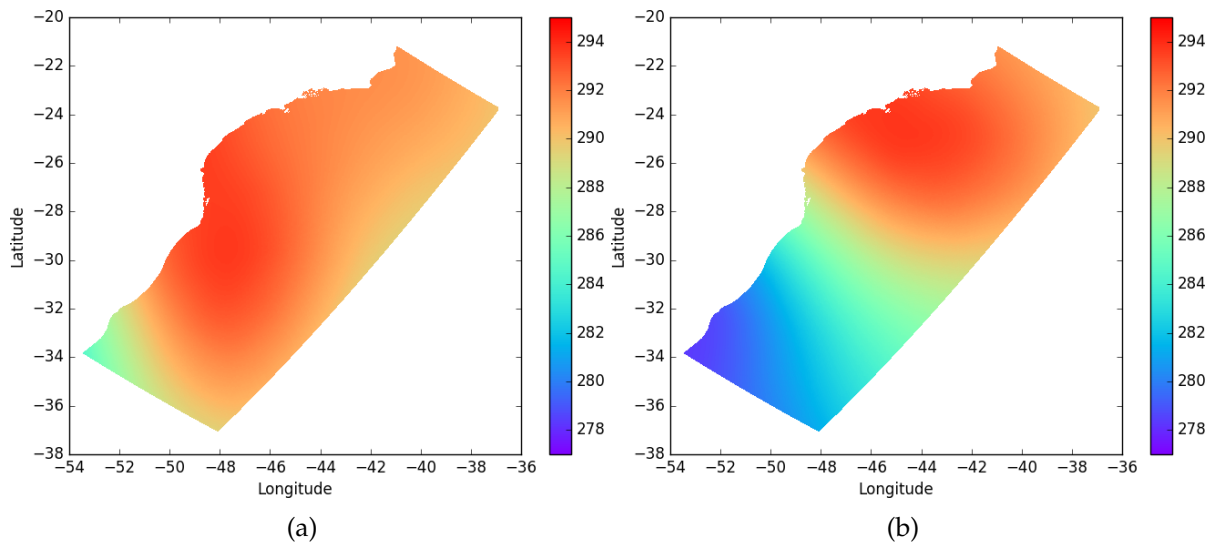


Figura 3.2: Resultado da temperatura do ar aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.2a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (3.2b), o dia 6 de julho de 2014.

### 3.1.2 Variável Pressão Atmosférica

Para a pressão atmosférica ao nível do mar (Figura 3.3), no período selecionado, houve uma variação de 98500 a 102500 hPa. Os tons mais azuis, representam menores pressões e, os mais avermelhados, pressões atmosféricas mais altas.

Nestes campos, também foram observadas as mesmas feições ruidosas citadas anteriormente. Estas, podem ser notadas claramente nas (Figuras 3.3a e 3.3c), onde regiões com maiores gradientes de pressão, mostram menor suavidade no mapa de cores. Já nos dados interpolados, (Figuras 3.3b e 3.3d), estas formas são mais suavizadas de acordo com o processo de interpolação utilizado.

Fisicamente, os resultados obtidos representam adequadamente o campo de pressão atmosférica para esta região da América do Sul. Logo, pode-se observar o centro estático de alta pressão localizado no oceano Atlântico Sul, o qual é responsável pela manutenção do campo de ventos dominante na região costeira do sul e sudeste do Brasil (Bastos e Ferreira, 2000).

No dia 5 de julho de 2014, uma zona de baixa pressão é observada na região centro-oeste e sul brasileira. Este núcleo é degenerado devido a influência de um centro móvel de baixa pressão que começa a se deslocar em direção a região sul e sudeste do Brasil. Estas condições meteorológicas sugerem a passagem de uma frente fria pela região sul

do país (Saldanha et al., 2010), corroborando a redução no campo de temperatura do ar observado para o mesmo período.

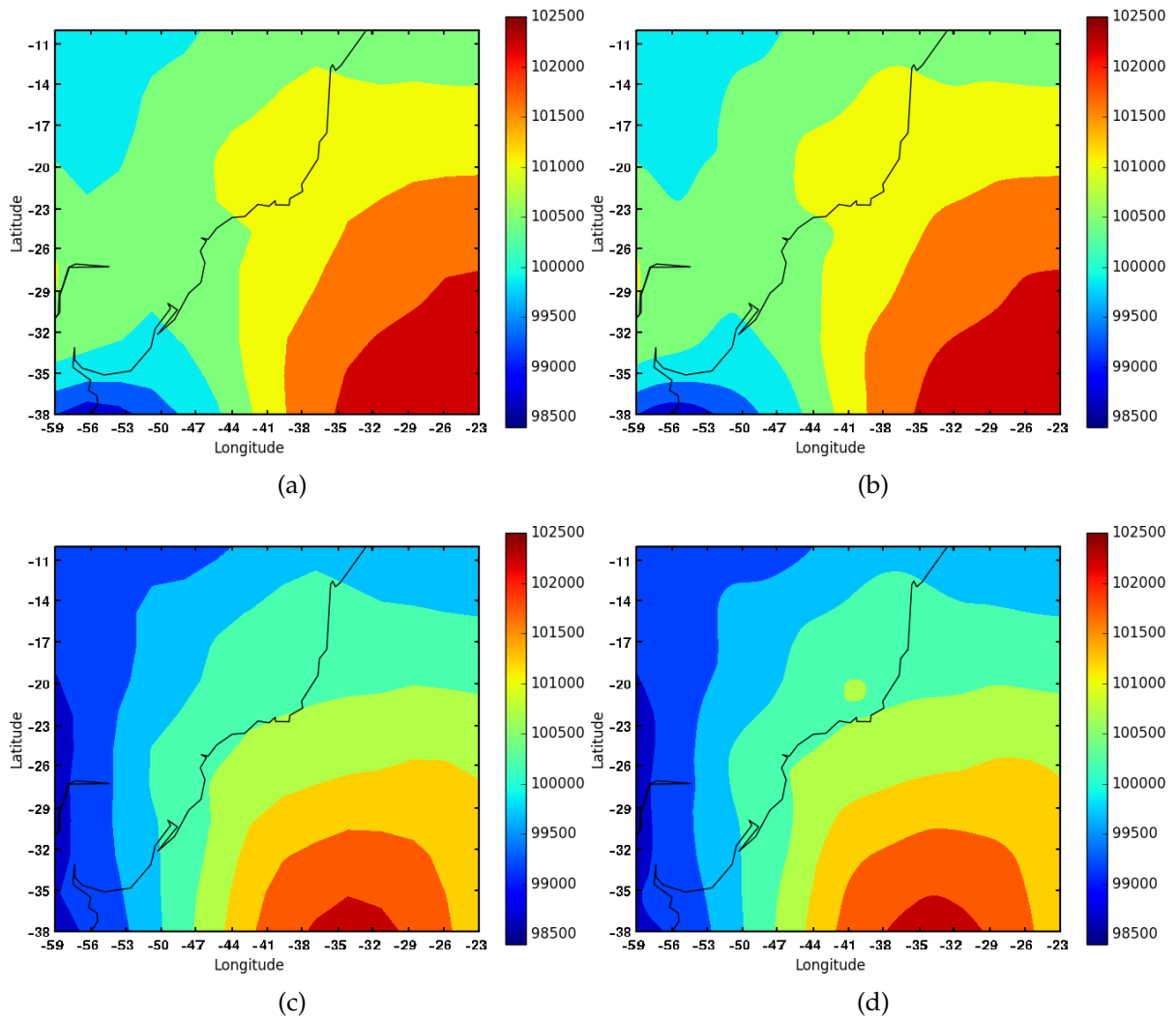


Figura 3.3: Comparação da variável pressão atmosférica. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014.

Na sequência, são apresentadas imagens que correspondem à interpolação que foi realizada sobre a malha para as simulações do TELEMAC3D. Assim, pode ser observada a suavidade no campo que representa a pressão atmosférica, mostrando o funcionamento adequado do processo de interpolação. As (Figuras 3.4a e 3.4b), apresentam o mesmo padrão de variabilidade espacial e temporal dos campos brutos obtidos do Reanalysis. Logo, as formas das feições observadas, são mantidas nos dados preparados para o modelo TELEMAC3D.

Nos dados, pode ser verificada a presença do centro de alta pressão do Atlântico

Sul na região oceânica do domínio do modelo. Em seguida, sua intensidade vai sendo reduzida na zona costeira da região sul do Brasil, conforme o tempo vai evoluindo entre os dias 5 e 6 de julho. Este comportamento confirma o que foi observado para o campo de temperatura do ar e sugere a passagem de uma possível frente fria pela região.

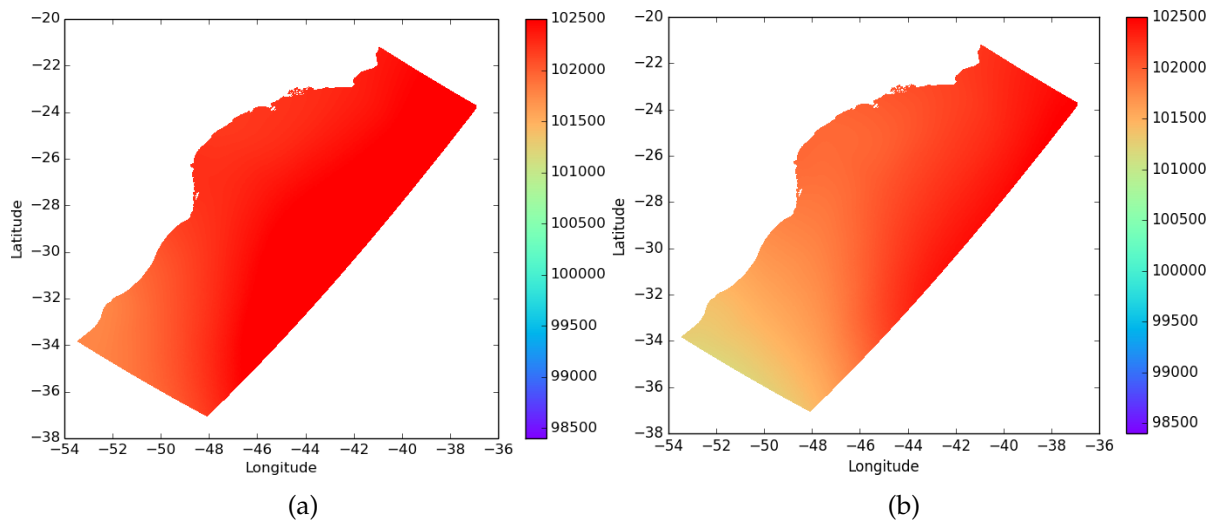


Figura 3.4: Resultado da pressão atmosférica aplicada no modelo TELEM3D. A (Figura 3.4a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.4b), o dia 6 de julho de 2014.

### 3.1.3 Variável Intensidade do Vento - Componentes U e V

A intensidade da componente U do vento é demonstrada a seguir na (Figura 3.5). A escala de variação desta variável ocorre entre -12 e 20 m/s, de forma que, valores negativos representam ventos que vem de oeste e, os positivos, os que vem de leste. Por outro lado, a intensidade da componente V do vento, é demonstrada a seguir na (Figura 3.6) com escalas de variação que ocorrem entre -16 e 16 m/s. Neste caso, os valores negativos representam ventos que vem do sul e, os positivos, ventos que vem do norte.

Assim como observado nas variáveis de temperatura do ar e pressão atmosférica, as componentes do vento também possuem baixa resolução em seus dados originais. Isto fica claro, ao observarmos as (Figuras 3.5a e 3.5c) e as (Figuras 3.6a e 3.6c), os quais representam os dados brutos provindos da base de dados do Reanalysis da NOAA. De forma similar ao que foi verificado nos dados de temperatura do ar e pressão

atmosférica, fica mais evidente a baixa resolução espacial dos ventos nas regiões de maiores gradientes de velocidade.

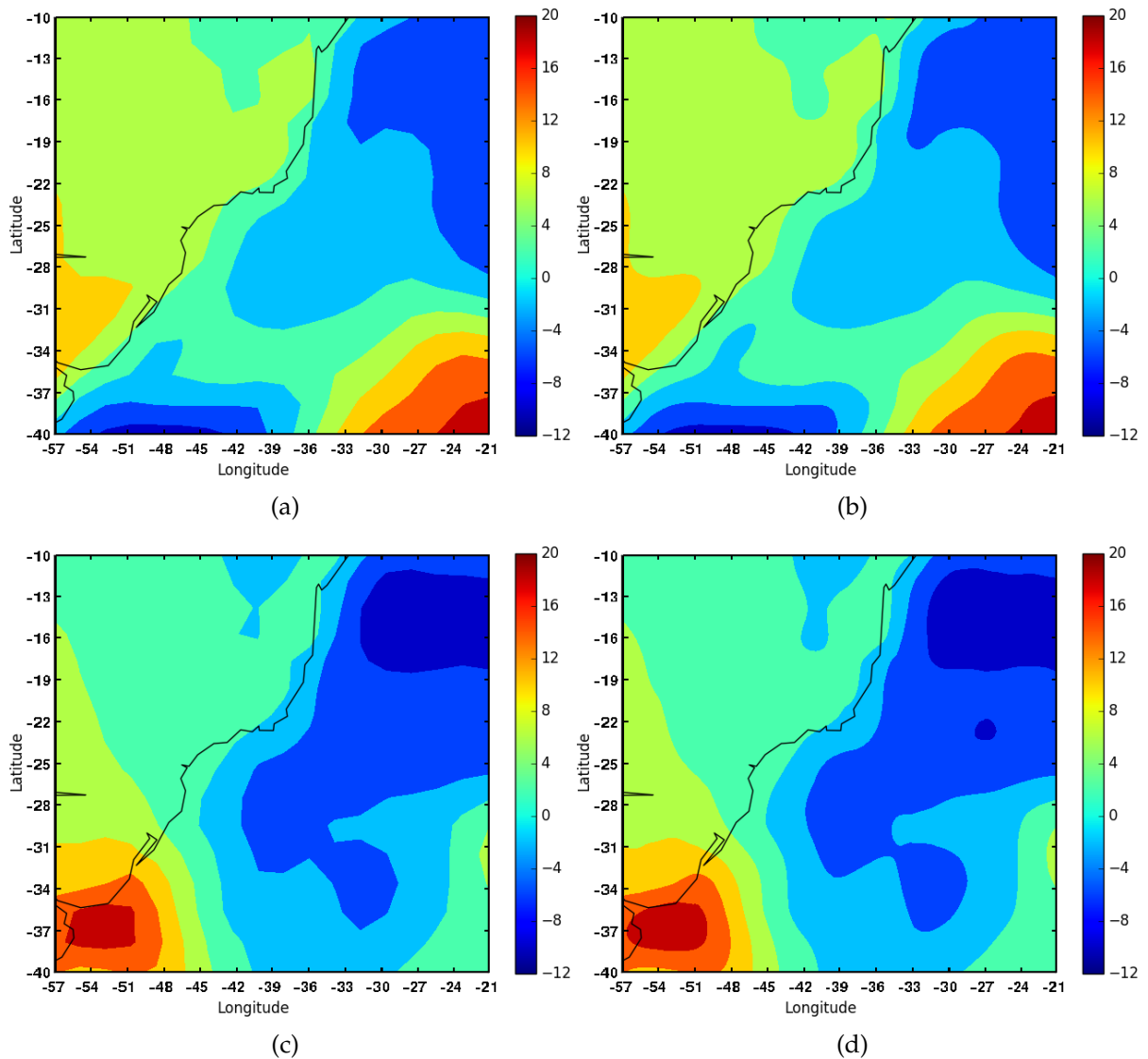


Figura 3.5: Comparação da intensidade da componente U do vento. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014.

Os resultados apresentados, indicam que ventos de quadrante norte, ocorrem de forma dominante na região do oceano Atlântico Sul. Isto acontece, devido a influência do centro estático de alta pressão na região nordeste, sudeste e centro-oeste do Brasil, conforme observado por (Bastos e Ferreira, 2000). Por outro lado, neste período do ano, ventos de quadrante sul, ocorrem de forma dominante na região sul do Brasil. A partir do dia 5 de julho, pode ser verificada a passagem da frente fria que se estende até a região sudeste.

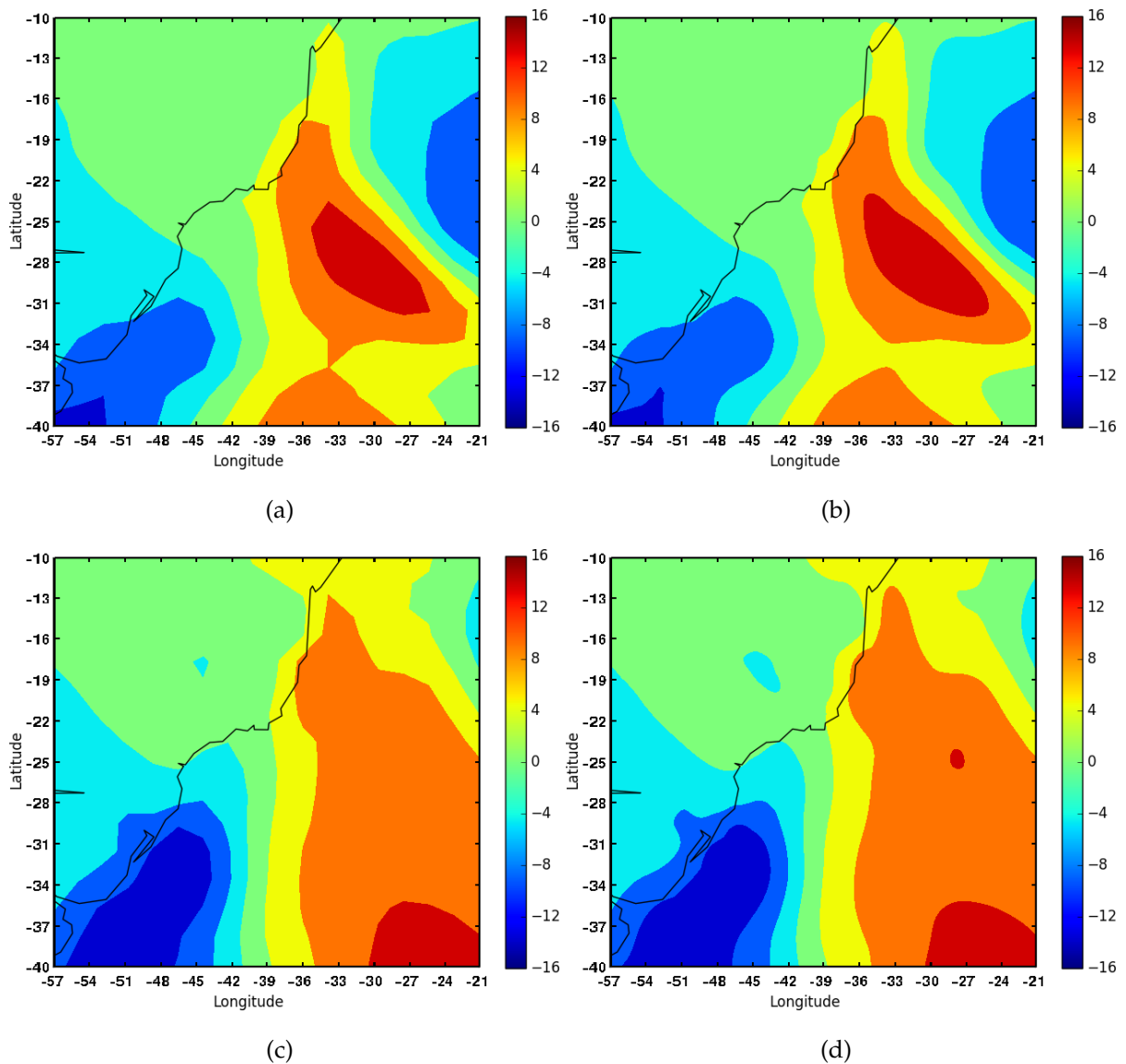


Figura 3.6: Comparação da intensidade da componente V do vento. As figuras (a) e (b) representam os dados brutos do dia 5 de julho de 2014 e, as figuras (c) e (d), dados interpolados no dia 6 de julho de 2014.

Os dados interpolados aplicados à malha que será utilizada no TELEMAC3D (Figuras 3.7 e 3.8) indicam, conforme observado nas imagens anteriores, conformidade com as feições indicadas nos dados originais e com o padrão de variabilidade temporal do período de análise. Os ventos de quadrante norte são mais observados de forma dominante na região oceânica e costeira do sudeste do Brasil. Enquanto que, os ventos de quadrante sul, são mais observados na região sul do domínio, a partir do dia 5 de julho.

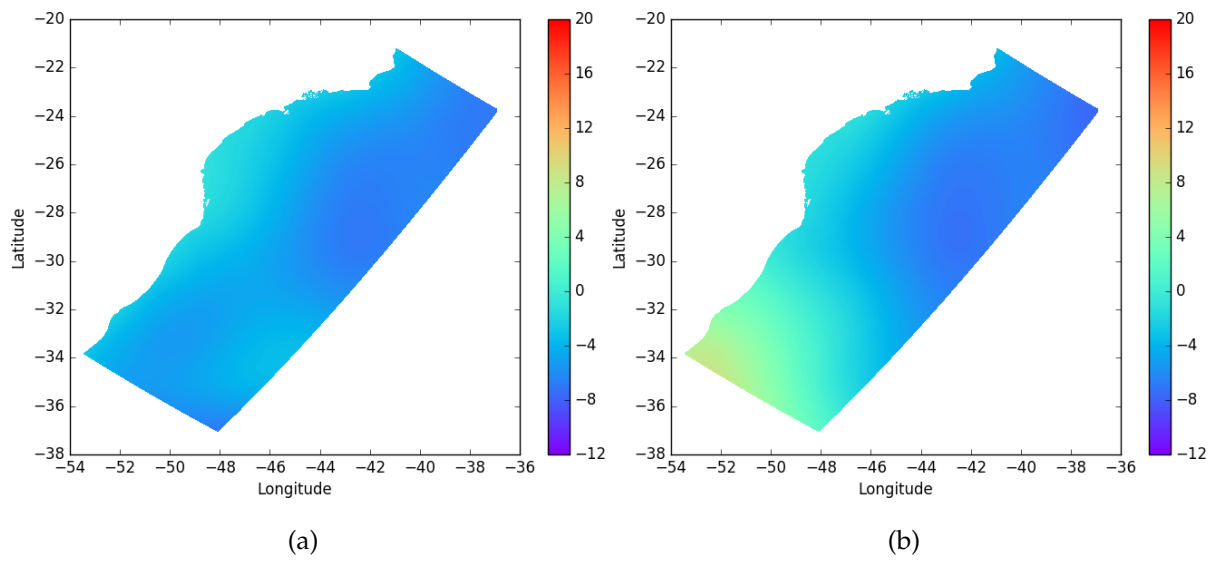


Figura 3.7: Resultado da componente U do vento aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.7a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.7b), o dia 6 de julho de 2014.

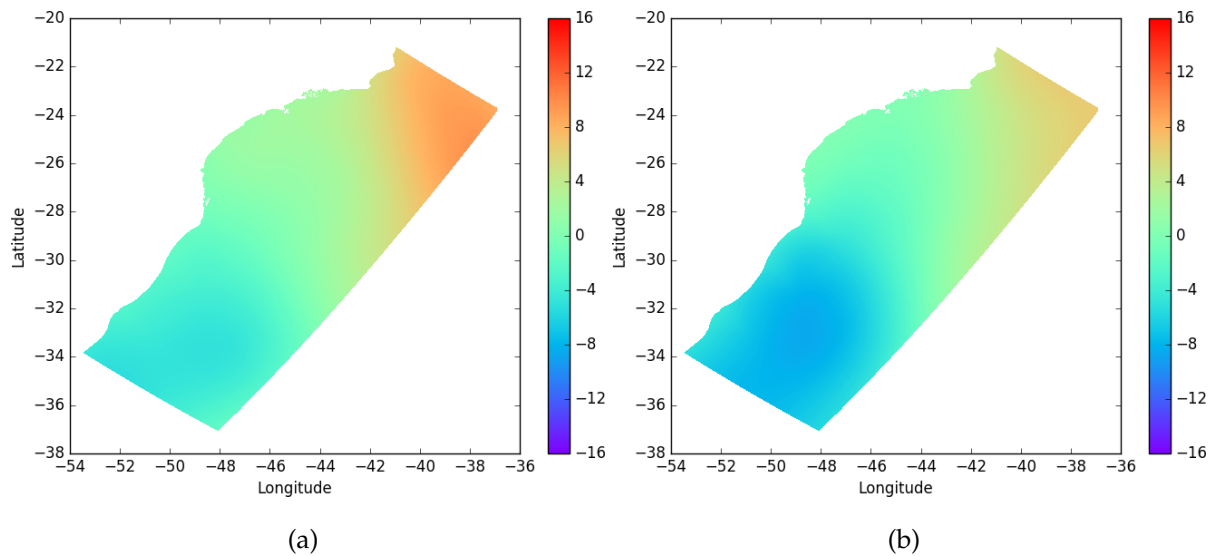


Figura 3.8: Resultado da componente V do vento aplicada no modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.8a) representa o dia 5 de julho de 2014 e, a (Figura 3.8b), o dia 6 de julho de 2014.



## 3.2 Banco de dados do HYCOM

Os procedimentos adotados na análise dos resultados do banco de dados do Re-analysis, foram aplicados de forma similar ao do HYCOM. Neste caso, os parâmetros escolhidos deste modelo oceânico foram os de: salinidade, temperatura e a intensidade das correntes, representada pela sua componente zonal (componente U) e meridional (componente V).

De maneira semelhante, os dados extraídos do banco de dados do HYCOM, são fornecidos ao modelo TELEMAC3D como condições iniciais e de contorno. As condições iniciais, são utilizadas em todos os nós da malha computacional e nas diferentes profundidades (níveis sigma) desejados na simulação. Por outro lado, as condições de contorno do modelo, devem ser prescritas em todos os contornos abertos (contornos oceânicos) da malha de elementos finitos e, para todos os níveis de profundidade durante o período da simulação.

As figuras desta seção, serão apresentadas através da comparação dos dados brutos, proveniente do modelo HYCOM, em relação aos mesmos dados, posteriormente a utilização da rotina de interpolação desenvolvida neste trabalho. Além disso, será possível observar a variação destes parâmetros em um dia selecionado (dia 5 de julho de 2014), para 3 diferentes níveis verticais. Estes dados serão utilizados como condições iniciais do modelo TELEMAC3D e a área escolhida para a análise, compreende a região que vai do Rio da Prata, localizado no Uruguai, até o sul da Bahia, na região nordeste do Brasil.

### 3.2.1 Variável Salinidade

A variável salinidade (Figura 3.9), no período selecionado, apresenta uma variação de 20 a 37. As imagens, do lado esquerdo, representam os dados brutos e, do lado direito, os dados tratados e interpolados. Os tons mais azuis representam as menores salinidades e, os avermelhados, as maiores.

Os dados brutos, obtidos através do modelo HYCOM, também apresentaram baixa resolução espacial em toda a região de estudo. Além disso, foi observada a ausência de dados em algumas camadas, principalmente nas áreas mais próximas da costa e nos

níveis mais profundos. Na (Figura 3.9c), que representa o nível 4 (profundidade 30 m), é possível observar áreas em branco próximo da linha da costa. O mesmo se repete no nível 10 (profundidade 200 m) como pode ser observado na (Figura 3.9e).

De acordo com a identificação das áreas com ausência de dados e, pela implementação da interpolação de vizinho mais próximo, estas regiões foram preenchidas com dados que equivalem aos que já existiam em outras áreas. Neste caso, podemos observar as (Figuras 3.9b, 3.9d e 3.9f), onde as regiões costeiras que não possuíam dados foram preenchidas.

Os resultados apresentados, indicam as condições de salinidade junto a região da PCSSB, em um dia, de um mês de inverno Austral. Pode ser observado que, as maiores salinidades ao largo da costa Brasileira, representam a propagação em direção ao sul da corrente do Brasil (Silveira et al., 2000). Neste período do ano, esta corrente é menos intensa sobre a plataforma continental Sul do país. Logo, a circulação dirigida por gradientes de densidade junto a zona costeira adjacente no sul é mais acentuada (Rossi-Wongtschowski e Madureira, 2006).

A circulação dirigida por gradientes de densidade, é resultado da descarga do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos. Estes, formam uma corrente costeira de menores salinidades e que se propaga em direção ao norte, junto a zona costeira (Rossi-Wongtschowski e Madureira, 2006). As camadas mais profundas do modelo HYCOM, indicam a presença de uma massa de água de salinidade menores que 36, as quais são relacionadas a circulação profunda do oceano Atlântico Sul (Lima, 2012).

Após o tratamento dos dados, os mesmos foram preparados para inicializar e forçar as condições de contorno do modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.10) se refere a camadas de profundidade em níveis sigma diferentes. Neste caso, a (Figura 3.10a) se refere ao nível 1, a (Figura 3.10b) se refere ao nível 4 e a (Figura 3.10c) ao nível 10. Esta malha compreende a região que vai da cidade do Chuí, no Rio Grande do Sul, até o limite norte do estado do Rio de Janeiro.

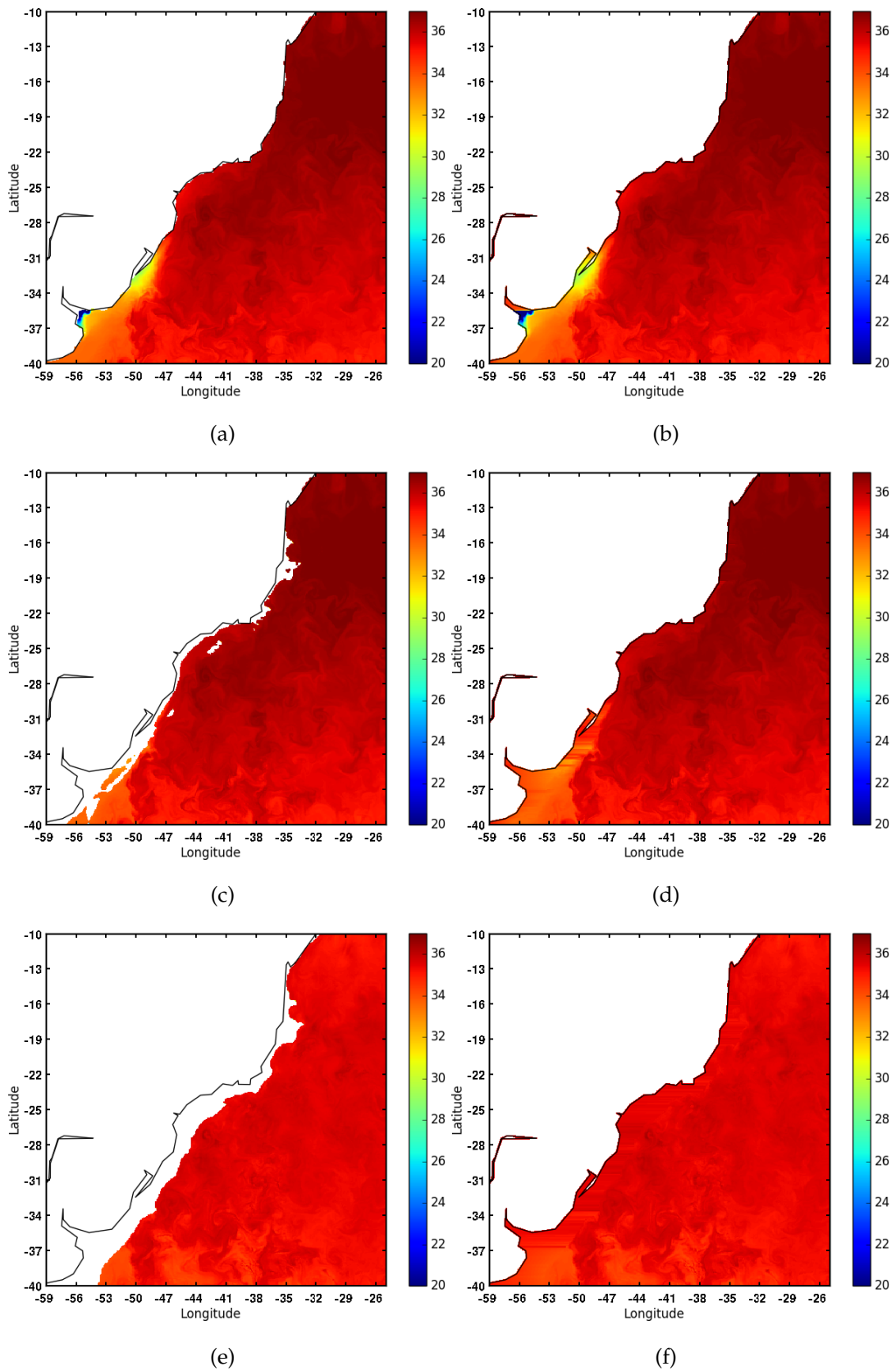
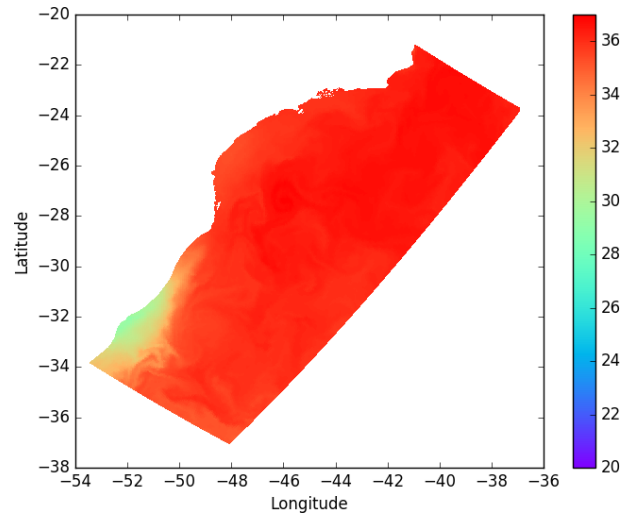
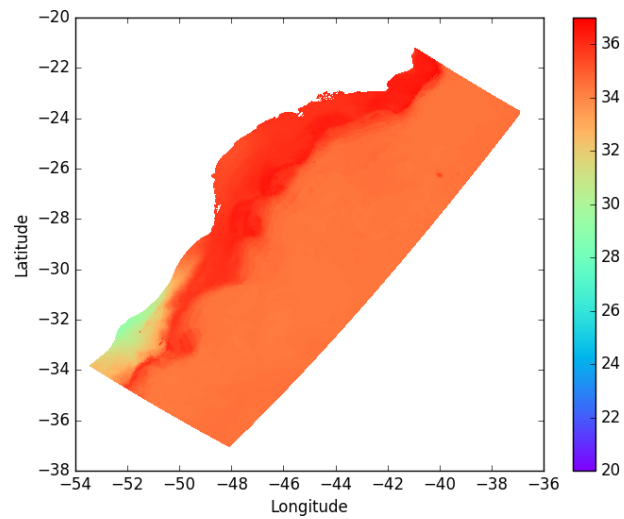


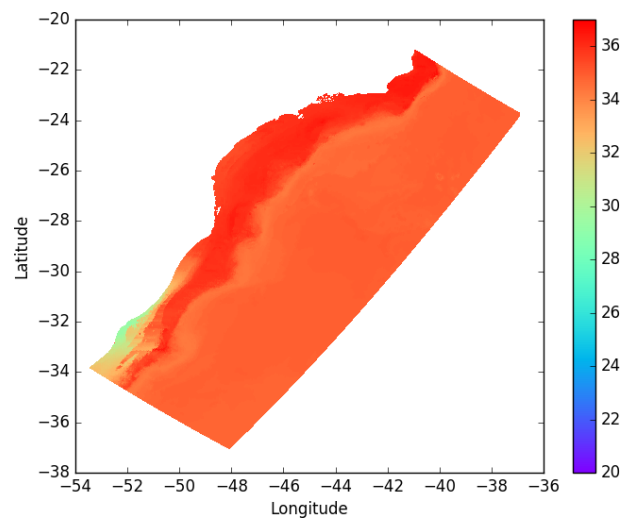
Figura 3.9: Comparação da variável salinidade. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As (Figuras 3.9a. e b. representam o nível 1 (superfície), as 3.9c. e d. o nível 4 (profundidade 30 m) e as 3.9e e f, o nível 10 (profundidade 200 m).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.10: Resultado da salinidade aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.9a o nível sigma 1, 3.9b o nível sigma 4 e 3.9c o nível sigma 10.

Nas (Figuras 3.10), pode ser observado o mesmo padrão dos dados brutos do modelo HYCOM. As maiores salinidades associadas à corrente do Brasil são observadas na região oceânica ao largo da PCSSB. Enquanto que, as menores salinidades, relacionadas à corrente dirigida por gradientes de densidade da descarga do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos, são observadas na região costeira da PCSSB.

É importante ressaltar que, conforme os níveis sigma se tornam mais profundos (Figuras 3.10b e 3.10c), o campo de salinidade passa a ser mais homogêneo na região oceânica. Por outro lado, junto à zona costeira, fica evidente que os campos, apresentam algumas discontinuidades inerentes à aplicação do método de interpolação, que se torna necessário para o preenchimento nas falhas dos dados brutos obtidos.

### 3.2.2 Variável Temperatura

A variável temperatura, aqui representada na (Figura 3.11), aparece com escala de variação que vai de 7.5 à 27.5 °C. Os dados brutos provindos do site do HYCOM, são apresentados do lado esquerdo enquanto que do lado direito são mostrados os dados tratados e interpolados. Os tons mais azuis representam as menores temperaturas e, os avermelhados, temperaturas mais altas.

Os dados brutos obtidos, apresentaram baixa resolução espacial, além da ausência de dados em algumas camadas nas áreas próximas da costa e nos níveis mais profundos. A (Figura 3.11c), representa o nível 4 (profundidade 30 m), sendo possível observar áreas em branco próximo da linha da costa. O mesmo padrão é verificado no nível 10 (profundidade 200 m) (Figura 3.11e).

O mesmo método de interpolação aplicado ao campo de salinidade, foi utilizado para preencher os espaços em branco, de forma que as regiões foram preenchidas com dados que equivalem aos que já existiam em outras áreas. Podemos observar a funcionalidade do método de interpolação aplicado nas (Figuras 3.11b, 3.11d e 3.11f), onde as regiões costeiras que não possuíam dados, foram preenchidas de maneira aceitável.

Os resultados apresentados corroboram as condições de temperatura junto a região da PCSSB durante um dia de um mês de inverno Austral. Pode ser observado que, as maiores temperaturas verificadas ao largo da costa brasileira, representam a propaga-

ção em direção ao sul da corrente do Brasil, conforme estudado por (Lima, 2012). O campo de temperatura deixa mais evidente a limitação de propagação desta corrente sobre a PCSSB neste período do ano (Rossi-Wongtschowski e Madureira, 2006).

A circulação costeira dirigida por gradientes de densidade na região da PCSSB, formada por águas de menores salinidades e menores temperaturas, torna-se mais intensa neste período do ano devido ao aumento da descarga fluvial dos rios afluentes do Rio da Prata e Lagoa dos Patos. Podemos ainda ressaltar que, as camadas mais profundas, com temperaturas menores que 10 °C, são relacionadas à presença de uma massa de água associada à circulação profunda do oceano Atlântico Sul (Rossi-Wongtschowski e Madureira, 2006).

Os dados de temperatura foram preparados para inicializar e forçar as condições de contorno do modelo TELEMAC3D. A (Figura 3.12) se refere a camadas de profundidade em níveis sigma diferentes, onde a (Figura 3.10a) representa o nível 1, a (Figura 3.12b) o nível 4 e a (Figura 3.12c) o nível 10.

Nas (Figuras 3.12) observamos o padrão similar aos dados brutos do modelo HYCOM. As maiores temperaturas associadas a corrente do Brasil, são observadas na região oceânica ao largo da PCSSB. Enquanto que, as menores temperaturas, associadas a descarga dos principais rios da região, são observadas na região costeira da PCSSB.

É importante ressaltar que, conforme os níveis sigma se tornam mais profundos (Figuras 3.12b e 3.12c), o campo de temperatura se torna mais frio e homogêneo na região oceânica. Isto ocorre por conta da presença das águas associadas à circulação profunda do oceano Atlântico Sul. Similarmente ao que foi observado para os campos de salinidade, junto à zona costeira, fica evidente que os campos interpolados, apresentam algumas discontinuidades. Neste caso, ocorre devido à aplicação do método de interpolação necessário para o preenchimento nas falhas dos dados brutos.

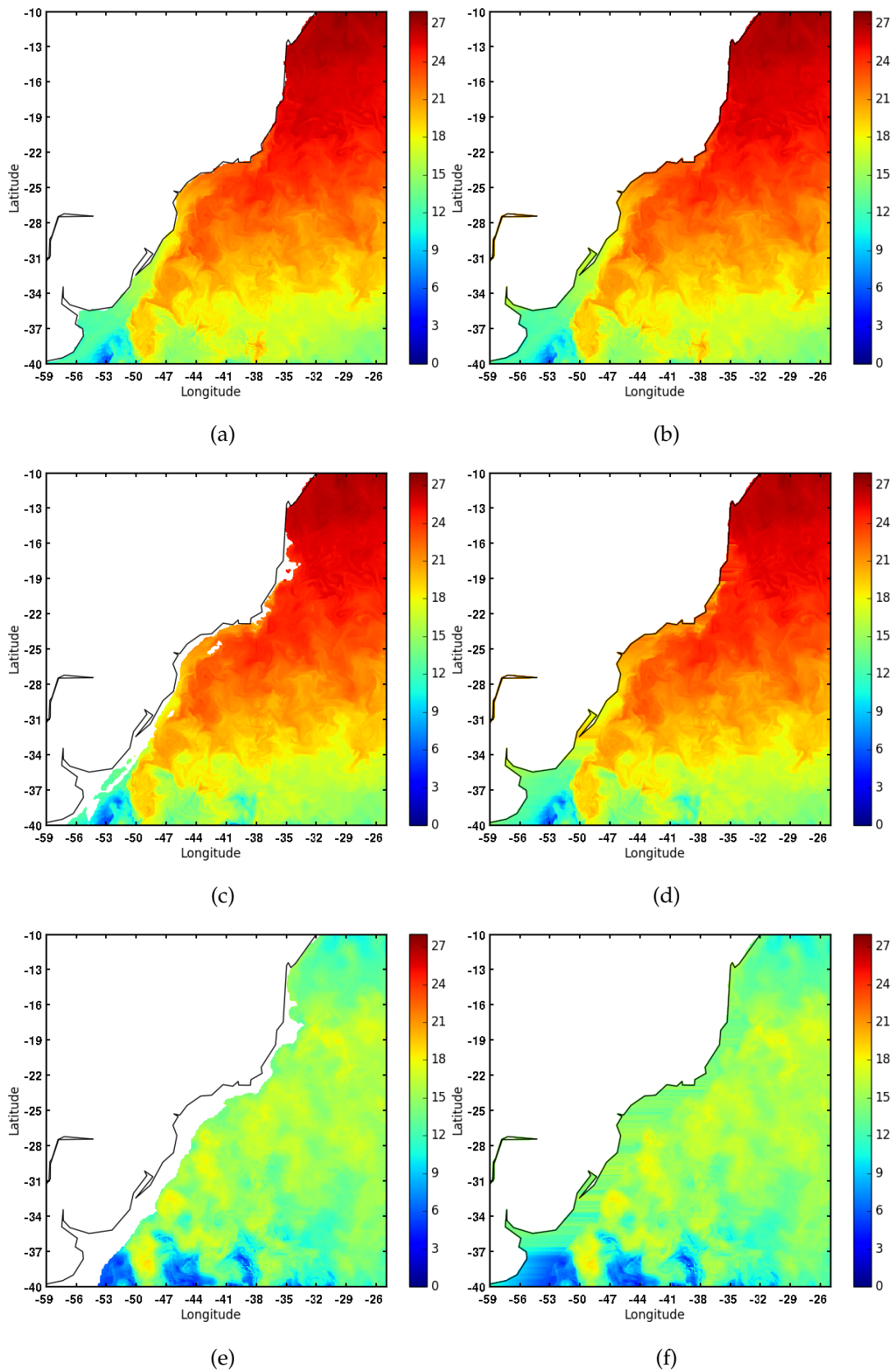
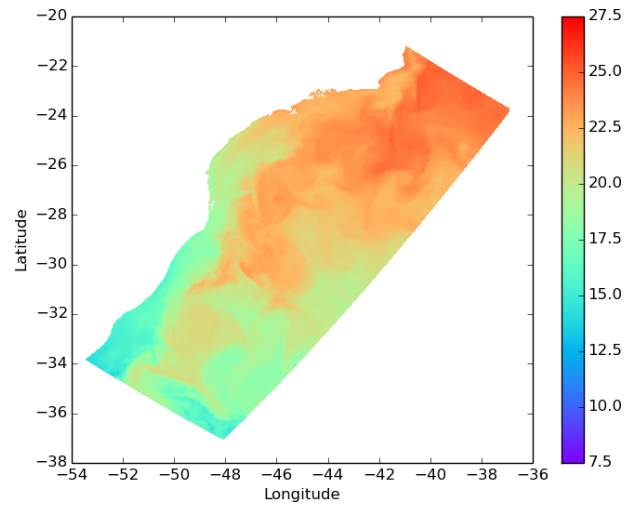
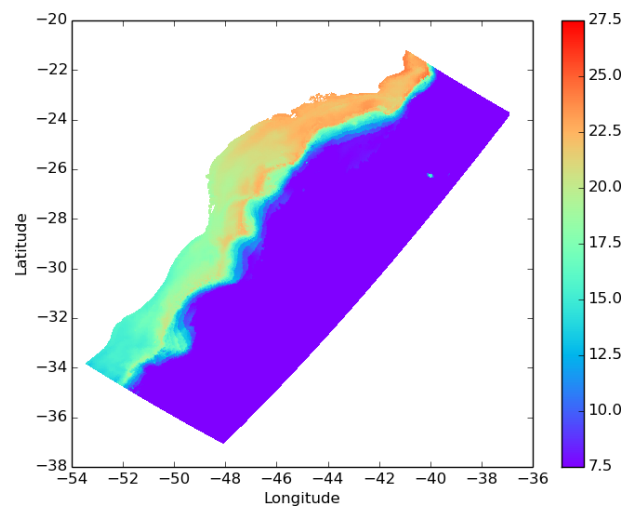


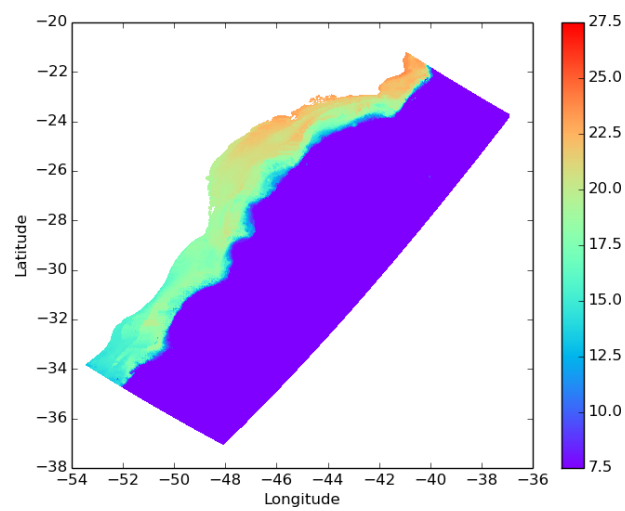
Figura 3.11: Comparação da variável temperatura. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As (Figuras 3.11a e b) representam o nível 1 (superfície), as (3.11c e d) o nível 4 (profundidade 30 m) e a (3.11e e f) o nível 10 (profundidade 200 m).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.12: Resultado da temperatura aplicada no modelo TELEM3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.9a. o nível sigma 1, 3.9b. o nível sigma 4, 3.9c. e o nível sigma 10.



### 3.2.3 Variável Intensidade da Corrente: Componente U e Componente V

A (Figura 3.13) representa a intensidade da corrente para componente U. Para esta componente houve uma variação na intensidade da corrente de -1 a 1 m/s. Os valores negativos representam correntes que vem de oeste e, os valores positivos, correntes que vem de leste. A (Figura 3.14) se refere a intensidade da corrente para a componente V. O mesmo intervalo de variação de -1 a 1 m/s foi considerado. Assim, os valores negativos representam correntes que vem de sul e, os positivos, correntes que vem de norte.

Conforme observado nas variáveis anteriores, os dados brutos apresentaram baixa resolução espacial e ausência de dados em algumas camadas. Isto ocorre nas áreas próximas da costa e nos níveis mais profundos. As (Figuras 3.13c e 3.14c), representam o nível 4 (profundidade 10 m), com áreas em branco próximo da linha da costa. Este mesmo padrão é observado no nível 10 (profundidade 200 m), conforme as (Figuras 3.13f e 3.14f).

De forma similar ao que foi aplicado as variáveis anteriores, o mesmo método de interpolação foi utilizado para preencher os espaços em branco de maneira adequada. Os resultados da interpolação e preenchimento dos espaços em branco podem ser observados nas (Figuras 3.13b, 3.14b, 3.13d, 3.14d e 3.13f, 3.14f), onde as regiões costeiras que não possuíam dados foram preenchidas.

De maneira geral, os resultados apresentados indicam que às camadas superficiais tem maiores intensidades de correntes devido a influência dos ventos atuando diretamente sobre a superfície do mar. A característica mais marcante nestes resultados aparecem pelas altas intensidades de correntes e condições de maiores vorticidades, que podem ser observadas na região oceânica ao sul da área de estudo. Esta particularidade pode ser associada a zona de convergência das correntes do Brasil e das Malvinas, a qual ocorre na região ao largo da plataforma continental Argentina (Silveira et al., 2000).

As (Figuras 3.15 e 3.16) se referem às camadas de profundidade em níveis sigma diferentes, onde as (Figuras 3.15a e 3.16a) se referem ao nível 1, as (Figuras 3.15b e 3.16b) ao nível 4 e as (Figuras 3.15c e 3.16c) ao nível 10.

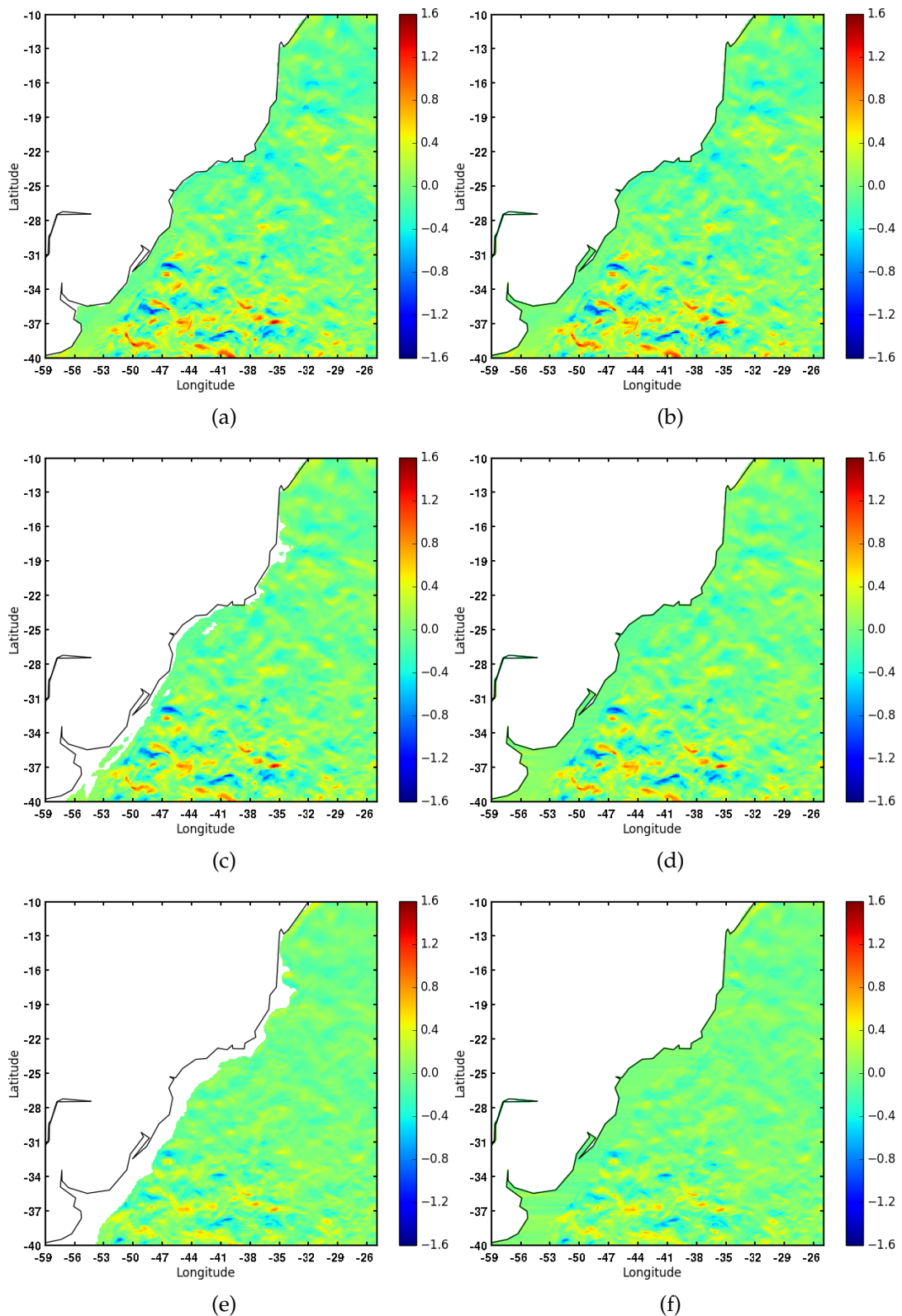


Figura 3.13: Comparação da variável velocidade da corrente - componente U. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As figuras (3.13a e b) representam o nível 1 (superfície), (3.13c e d), o nível 4 (profundidade 30 m) e (3.13e e f), o nível 10 (profundidade 200 m).

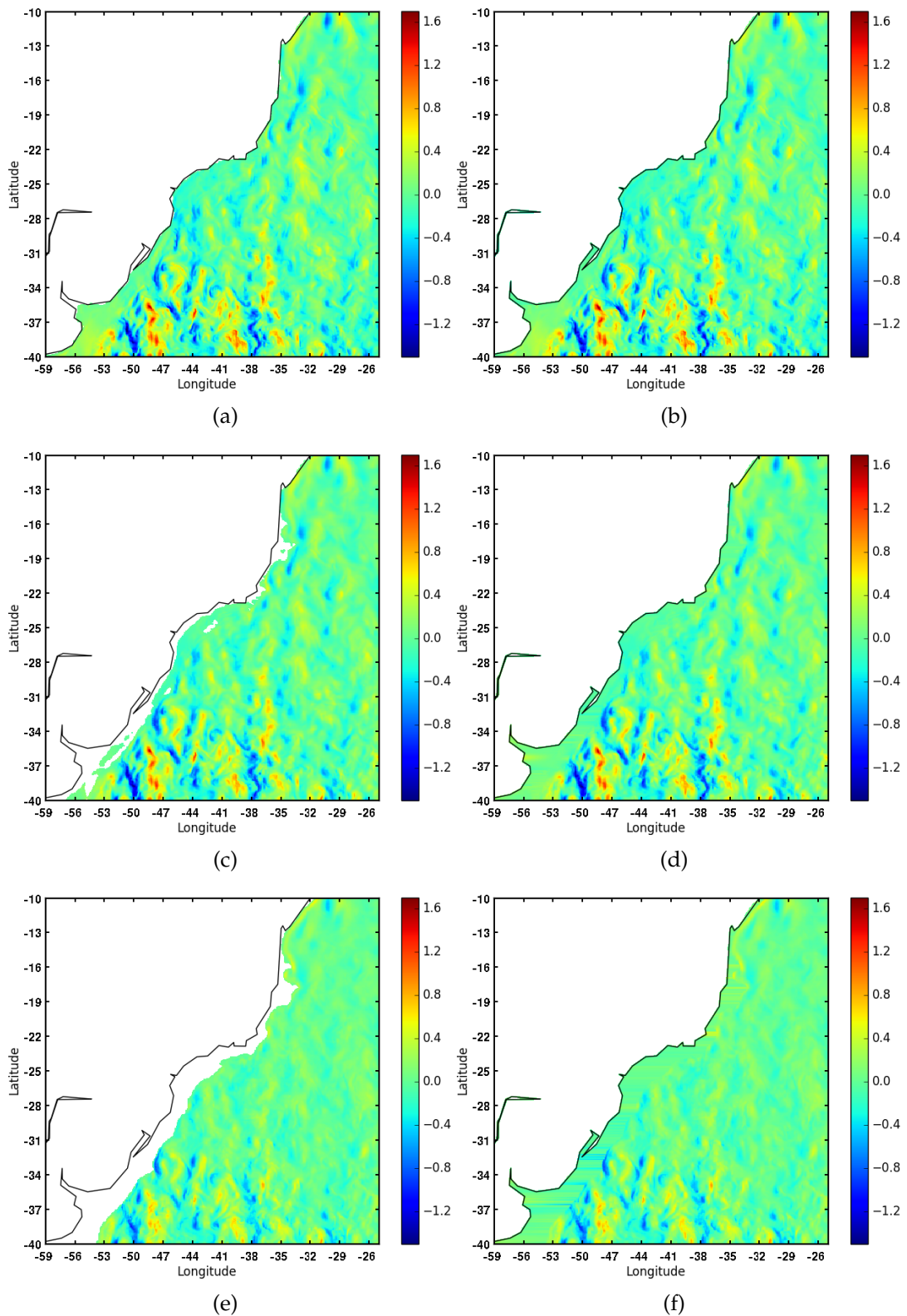
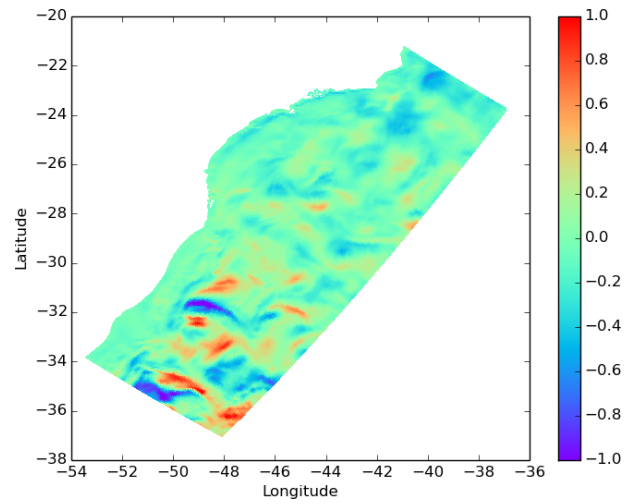
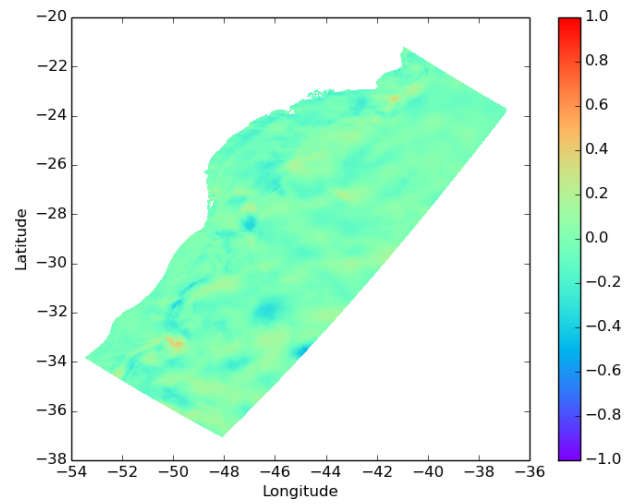


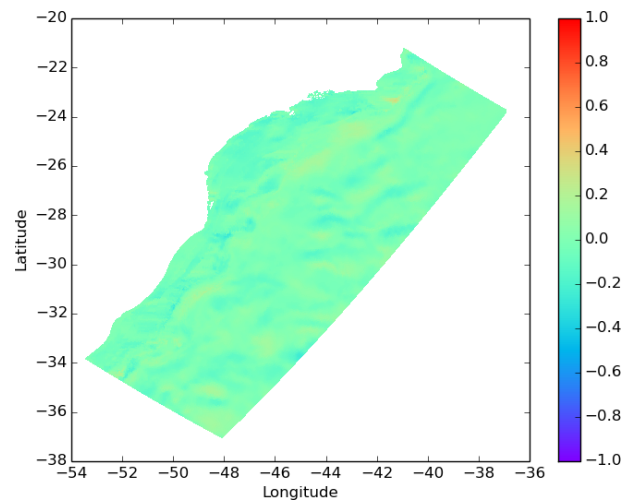
Figura 3.14: Comparação da variável velocidade da corrente - componente V. Todas as figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014. As figuras (3.14a e b) representam o nível 1 (superfície), (3.14c e d), o nível 4 (profundidade 30 m) e (3.14e e f), o nível 10 (profundidade 200 m).



(a)

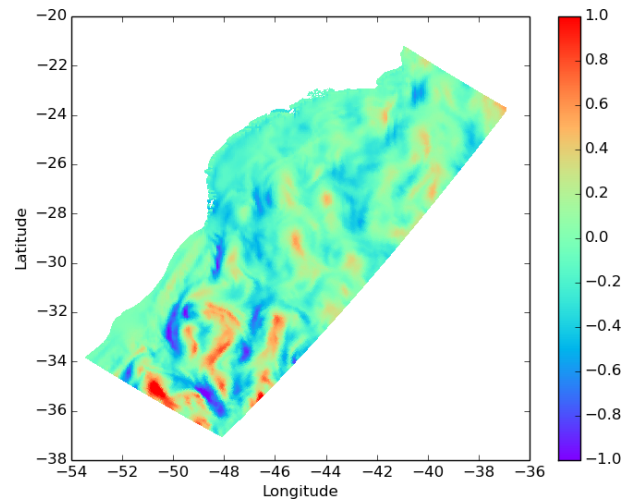


(b)

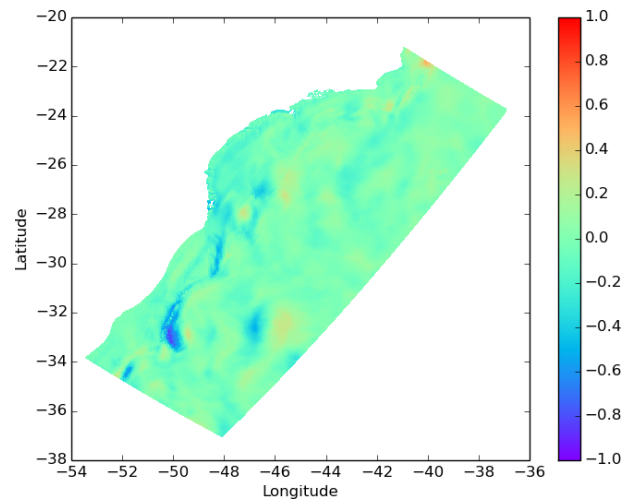


(c)

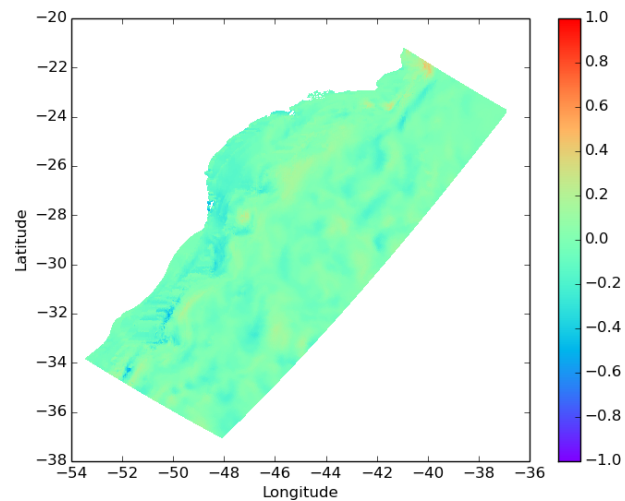
Figura 3.15: Resultado da velocidade da corrente - componente U, aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.15a o nível sigma 1, 3.15b o nível sigma 4, 3.15c e o nível sigma 10.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.16: Resultado da velocidade da corrente - componente V aplicada no modelo TELEMAC3D. As figuras correspondem ao dia 5 de julho de 2014, sendo 3.16a o nível sigma 1, 3.16b o nível sigma 4, 3.16c e o nível sigma 10.

### 3.3 Análise de Diferenças em Simulações Numéricas

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações do modelo TELEMAC3D, utilizando a rotina de tratamento de dados atualmente adotada no LANS3D e a rotina que foi desenvolvida no âmbito deste trabalho. Logo, foram realizadas simulações de 10 dias, no período de que vai de 05 à 14 de julho de 2014, considerando o mesmo domínio numérico utilizado para o tratamento dos dados.

As duas simulações numéricas consideram as mesmas parametrizações físicas utilizadas nos estudos de Tavora et al. (2014), Stringari et al. (2012), Kirinus e Marques (2012), Marques et al. (2012), Marques (2011). As únicas diferenças que ocorrem nos resultados do modelo, são referentes aos métodos de tratamento das interpolações utilizadas na preparação das condições iniciais e de contorno. Pois, a rotina implementada neste trabalho, utiliza o método de interpolação de vizinho mais próximo, enquanto que, o método atualmente utilizado no LANS3D, é implementado com uma função conhecida como INPAIN3D (Kirinus e Marques, 2015), (Kirinus et al., 2015), (Pezzato et al., 2015).

Os resultados são comparados na forma de médias temporais para as variáveis de saída do modelo TELEMAC3D. Já as diferenças, são confrontadas através da utilização de erro absoluto em todo o domínio numérico. Séries temporais em alguns pontos do domínio, são utilizadas para a realização da análise das diferenças ao longo do tempo. A (Figura 3.17), apresenta o mapa da região de estudo onde os 3 pontos escolhidos, demarcados com círculos vermelhos, são utilizados para a análise de séries temporais.

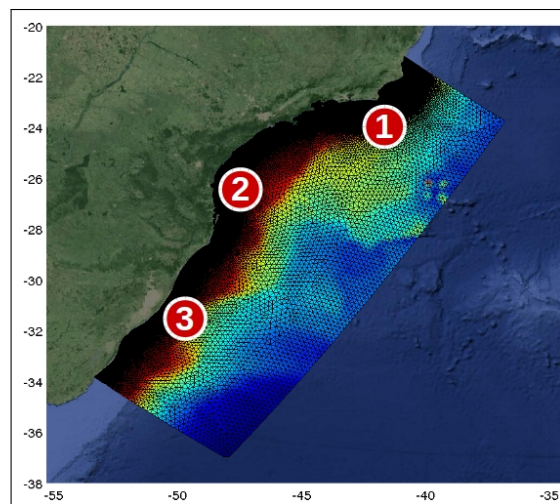


Figura 3.17: Pontos de amostras do comportamento das variáveis de saída do modelo TELEMAC3D.

O Ponto 1, representa uma região na costa do estado do Rio de Janeiro, mais próximo da cidade de Cabo Frio. O Ponto 2, se localiza na altura do estado do Paraná, perto do município do Pontal do Paraná. E, por fim, o Ponto 3, se encontra alinhado à cidade de Tavares, no estado do Rio Grande do Sul.

### 3.3.1 Variáveis de saída do modelo TELEMAC3D

As simulações do modelo TELEMAC3D utilizam como condições iniciais e de contorno superficiais as variáveis de: pressão atmosférica, temperatura do ar e a intensidade do vento, representadas pelas componentes: zonal (componente U) e meridional (componente V). Estas variáveis, são preparadas a partir de dados do Reanalysis da NOAA. As mesmas simulações utilizam como condições iniciais e de contorno oceânicas, as variáveis de: salinidade, temperatura e a intensidade de correntes, representada pela sua componente zonal (componente U) e meridional (componente V), as quais são obtidas a partir de dados do banco de dados do HYCOM.

O modelo TELEMAC3D apresenta como resultados da simulação todas estas variáveis, exceto a de temperatura do ar, visto que, o modelo utiliza como condição de contorno, mas não fornece sua saída como resultado. Outro ponto a ser considerado é que, por se tratar de um modelo hidrodinâmico, os dados atmosféricos do Reanalysis não são calculados no interior do domínio numérico. Eles apenas são utilizados para representar a interação entre o oceano e a atmosfera como condições de contorno superficiais.

#### Pressão Atmosférica

Na figura a seguir (3.18 A), lado direito, parte superior, é apresentada a média da pressão atmosférica simulada para a região em estudo, com as condições de contorno preparadas com a rotina atual do LANSD. No mesmo lado, parte inferior, é apresentada a média da mesma região, utilizando a rotina desenvolvida neste trabalho. Nestas figuras, as escalas variam entre 102150 e 102600 hPa. As cores em tons de azul representam menores pressões e, os avermelhados, as maiores pressões atmosféricas.

A análise visual das médias dos resultados indicam uma boa semelhança entre os dados utilizados pelo modelo, considerando os diferentes métodos de preparo. A partir da (Figura 3.18 B), pode ser observado que os dados interpolados através do método desenvolvido neste trabalho, tem variações mais suaves, devido ao grande nível de

refino de dados que é necessário para o adequado uso do método de interpolação de vizinho mais próximo. Do ponto de vista físico, é possível observar que em ambas as situações, as feições de alta e baixa pressão, as quais sugerem a passagem de uma frente fria pela região, são bem representadas.

A análise de erro absoluto (Figura 3.18 C), indica que a diferença entre os métodos de preparo dos dados para esta variável, tem uma pequena variação, podendo atingir o máximo de 22 hPa. Do ponto de vista geral, as variações são aceitáveis, considerando as escalas de variabilidade do campo de pressão atmosférica e o pequeno erro médio de 3.923 hPa.

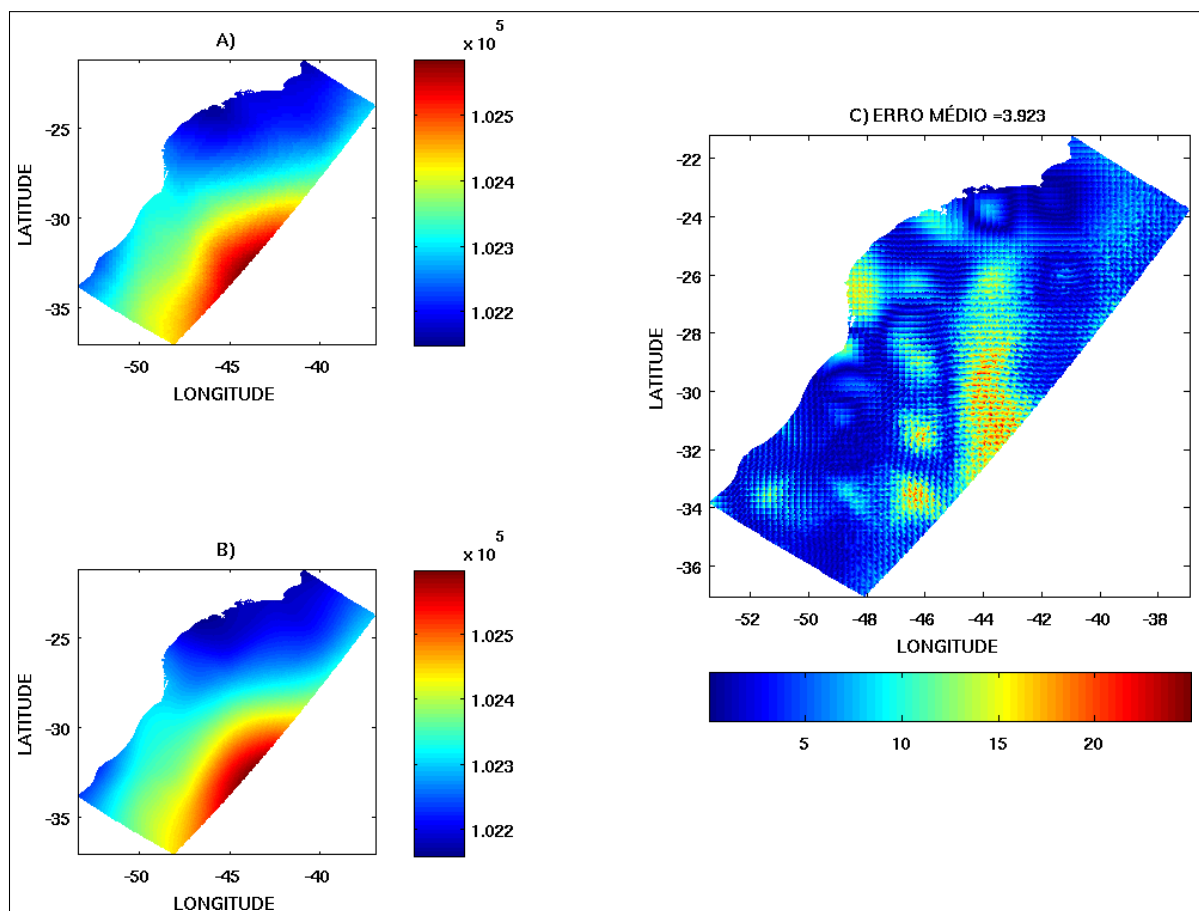


Figura 3.18: Comparação entre os campos médios de pressão atmosférica entre 05 e 14 de julho de 2014.

A (Figura 3.19) representa séries temporais do campo de pressão atmosférica para os 3 pontos apresentados anteriormente, entre 05 e 14 de julho de 2014. O eixo horizontal, indica o tempo em escala de horas e, o vertical, a pressão atmosférica em escala de hPa. As curvas em preto demonstram a variável na simulação preparada com a rotina



atual do LANS3D. Já as linhas em vermelho, a variável na simulação preparada com a rotina desenvolvida utilizando o método de vizinho mais próximo.

Através da análise dos resultados, nota-se que, no período simulado, o campo de pressão atmosférica tem uma pequena variação temporal e ambos os métodos de preparação de condições de contorno conseguem representar a variabilidade das séries temporais. Desta forma, os resultados apresentados mostram pequenas variações quando são comparadas, indicando um funcionamento adequado da rotina desenvolvida neste trabalho.

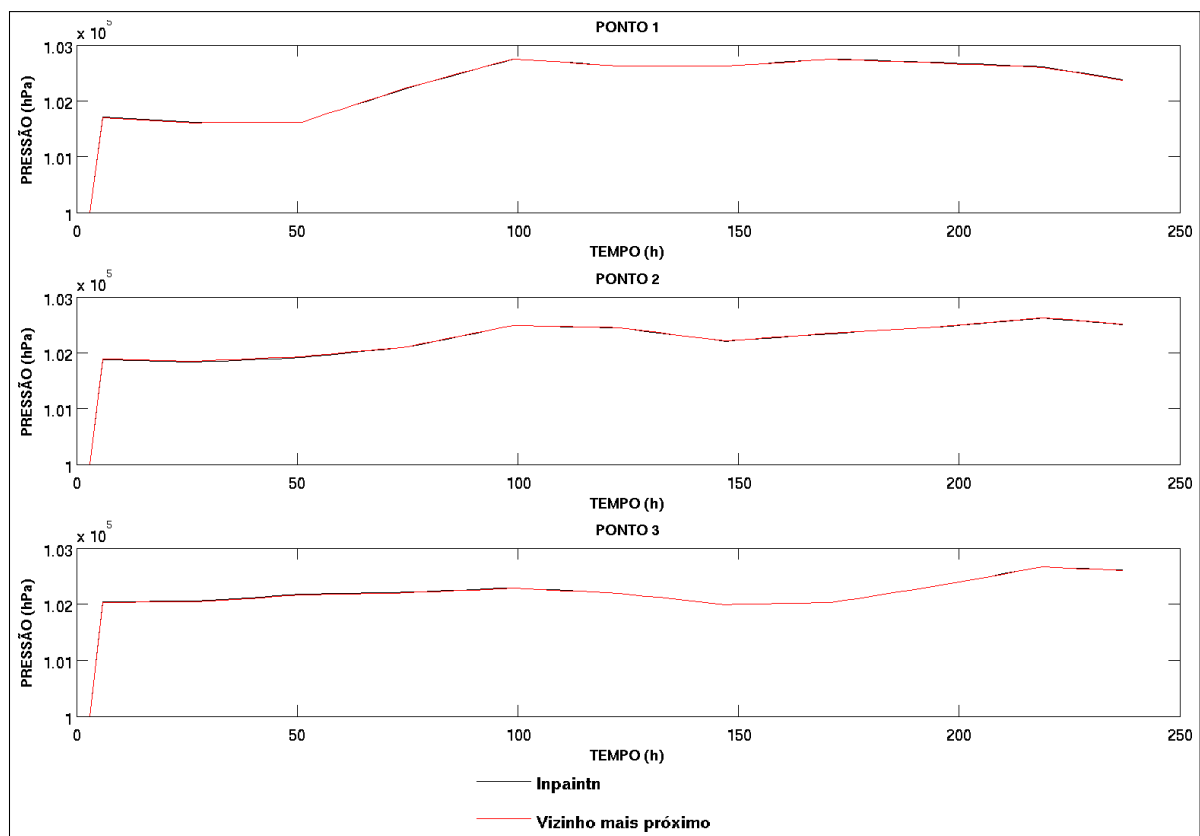


Figura 3.19: Séries temporais de pressão atmosférica obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

### Intensidade do Vento

A intensidade do vento, calculada com base nas componentes U e V do vento, é demonstrada na (Figura 3.20). No lado direito, temos as intensidades médias simuladas pelo TELEMAC3D, as quais foram preparadas com as duas diferentes rotinas de condições de contorno. A figura de cima representa as condições preparadas com a

rotina atualmente utilizada no LANSD e, a de baixo, com a desenvolvida neste trabalho. As escalas das figuras variam entre 1 e 6 m/s, onde as áreas em azul, possuem baixa intensidade do vento, enquanto que, as que estão em tons avermelhados, indicam maiores intensidades.

De forma similar ao campo de pressão, a análise das médias (3.20 A e 3.20B), indicam semelhança entre os dados utilizados pelo modelo, considerando os diferentes métodos de preparo. Novamente, observa-se que os dados interpolados através do método desenvolvido neste trabalho, tem variações mais suaves, devido ao grande nível de refino de dados, necessário para o adequado uso do método de interpolação de vizinho mais próximo (3.20 B). Pode ser verificada pela análise destes campos médios que, as regiões de máxima intensidade dos ventos, as quais são associadas ao Anticlone do Atlântico Sul, são bem representadas pela utilização de ambos os métodos de tratamento de condições de contorno.

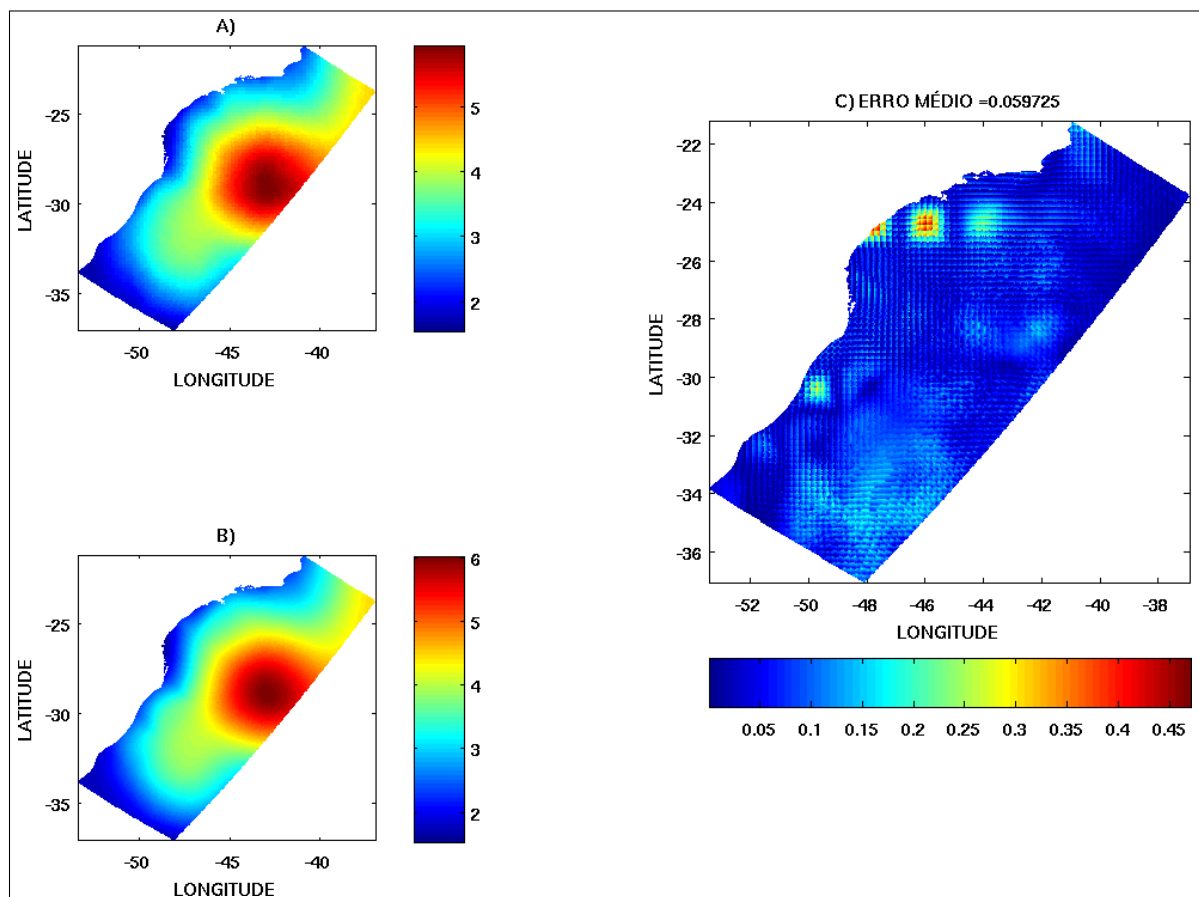


Figura 3.20: Comparação entre os campos médios de intensidade do vento entre 05 e 14 de julho de 2014.

A análise de erro absoluto (3.20 C) novamente indica que, a diferença entre os métodos de preparo dos dados para esta variável tem uma pequena variação, podendo atingir o máximo de 0.5 m/s. As maiores variações são observadas próximo às regiões costeiras, especialmente, na área da Bacia de Santos. Entretanto, do ponto de vista geral, as variações são aceitáveis, considerando as escalas de variabilidade do campo de intensidade do vento e um baixo erro médio de 0.059725 m/s.

Conforme apresentado anteriormente para a pressão atmosférica, na análise da intensidade do vento, foram selecionados os mesmos 3 pontos da região em estudo. A (Figura 3.21) representa as séries temporais entre 05 e 14 de julho de 2014, onde o eixo horizontal, indica o tempo em horas e, o eixo vertical, indica a intensidade do vento em m/s. As curvas em preto, representam a variável na simulação preparada com a rotina atual e, as linhas em vermelho, a variável na simulação preparada com a rotina desenvolvida neste trabalho.

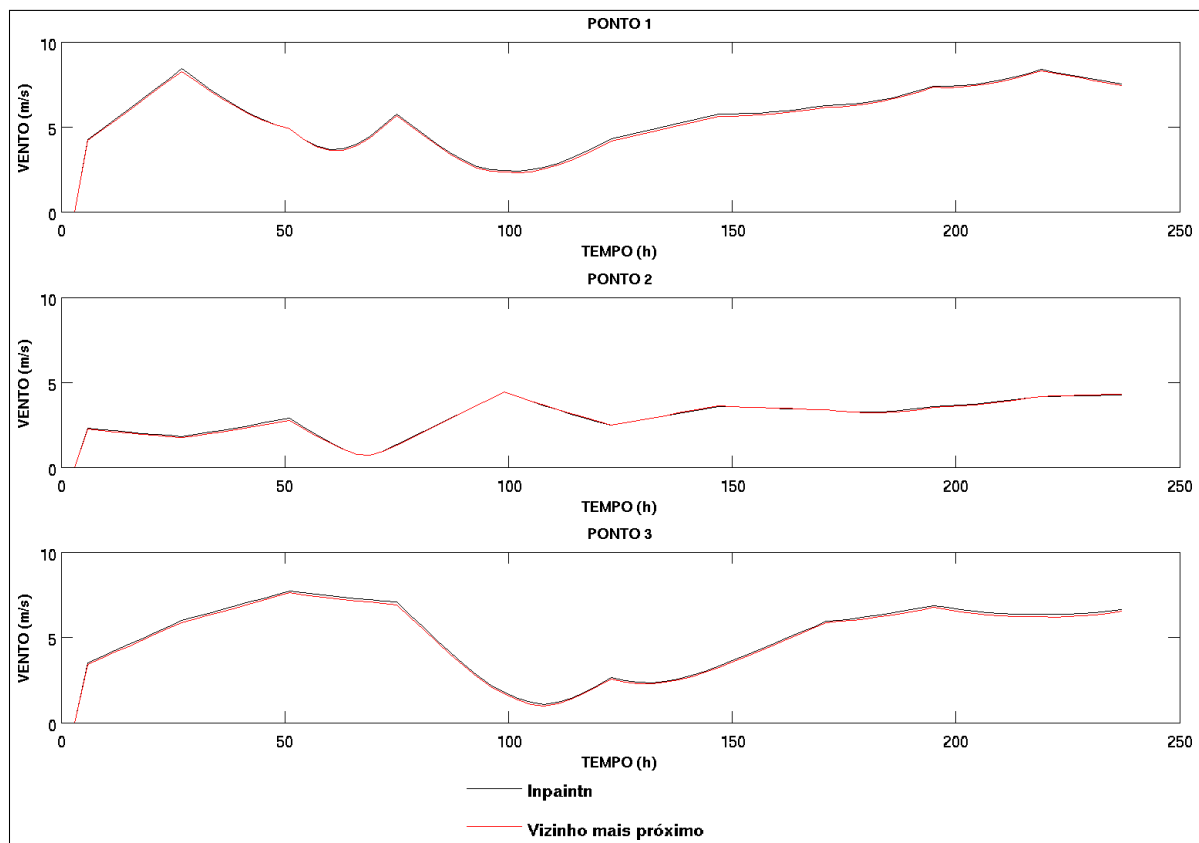


Figura 3.21: Séries temporais de intensidade do vento obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

Analisando as séries temporais, nota-se que as diferenças são pequenas ao longo do tempo, considerado a escala de variabilidade do vento na região de estudo. Vê-se, mais precisamente no ponto 2, entre o segundo e o terceiro dia de simulação, uma diferença mais significativa, que pode ser associada à região da Baía de Santos, conforme (Figura 3.20 C). Esta, representa uma maior diferença entre as médias de intensidade.

### **Salinidade da Água do Mar**

A (Figura 3.22), apresenta os mapas de salinidade média da água do mar na camada sigma 10, no domínio numérico (camada subsuperficial). As figuras da direita, representam os campos de salinidade do modelo TELEMAC3D, calculados de acordo com as diferentes rotinas de tratamento de dados de contorno. As escalas variam entre 30 e 36, onde, as tonalidades azuladas se referem às menores salinidades, enquanto que, as maiores salinidades, são representadas pelas cores avermelhadas.

Com base na análise dos resultados médios do modelo (Figura 3.22 A e figura 3.22 B), pode ser observado que as estruturas importantes da região, como a corrente do Brasil, são mais salgadas e que seguem em direção ao sul na região da Plataforma Continental. Além disso, pode ser verificada a corrente costeira dirigida por gradientes de densidade, com menores salinidades e que, seguem em direção ao norte, junto a zona costeira. Estas feições são bem representadas pelo modelo em ambos os casos. Desta forma, constatamos que as rotinas de preparação de condições iniciais e de contornos oceânicos, funcionaram de maneira adequada para a alimentação do modelo numérico.

A (Figura 3.22 C), representa um mapa do erro absoluto médio, calculado com base nos campos médios de salinidade obtidos através do modelo TELEMAC3D. Pode-se observar que os erros na região oceânica são menores do que 0.3, enquanto que, os maiores, aparecem na região da zona de frente, entre a corrente costeira e a corrente do Brasil. Isto ocorre devido ao maior gradiente de salinidade observado nesta região. O diferente método de tratamento dos dados de condições de contorno, associado a cada uma das rotinas, pode propagar de forma diferente as variações de salinidade dos contornos. Entretanto, as diferenças são aceitáveis, dadas as escalas de variação do campo de salinidade e um pequeno erro médio de 0.062673.

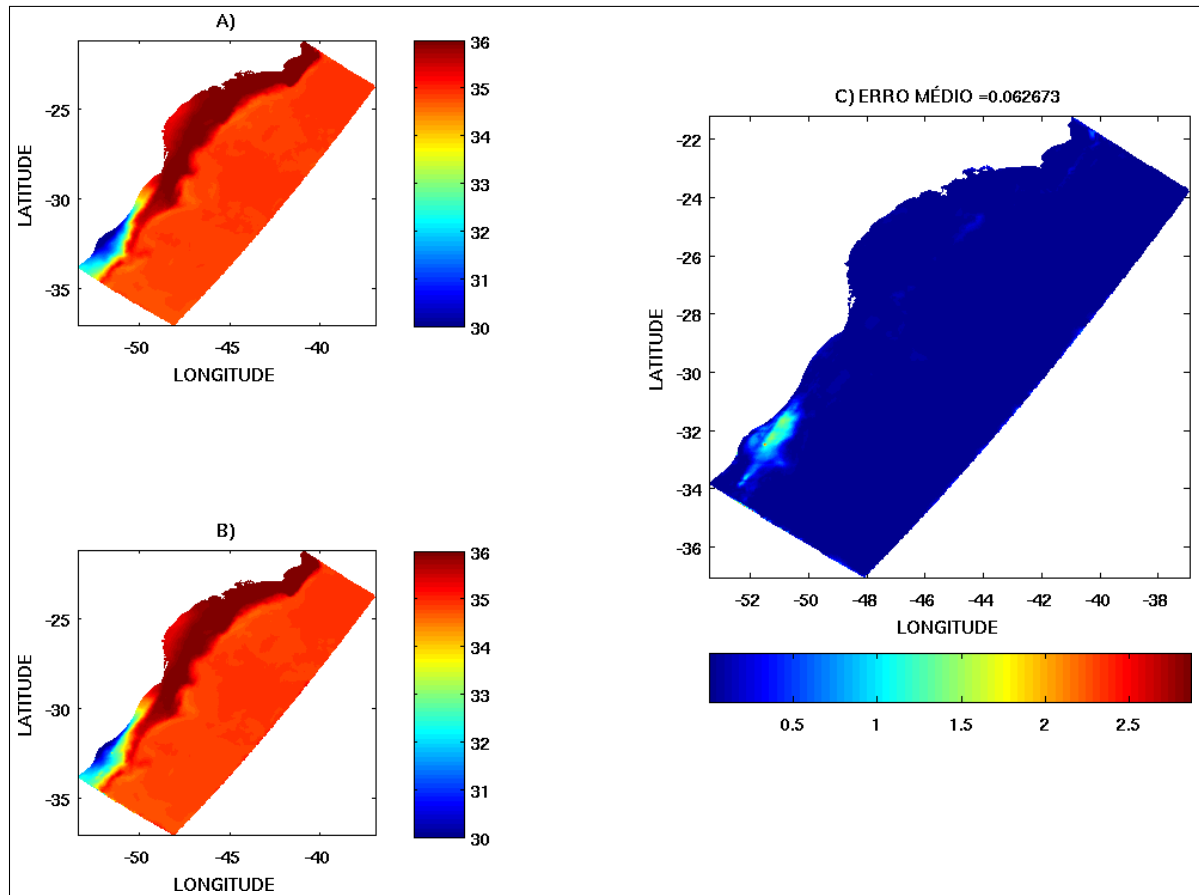


Figura 3.22: Comparação entre os campos médios de salinidade da água do mar na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014.

A (Figura 3.23) representa as séries temporais para os 3 pontos da região de estudo. Estas séries foram obtidas entre 05 e 14 de julho de 2014, onde o eixo horizontal, indica o tempo em horas e o vertical indica a salinidade. As curvas em preto representam a variável na simulação preparada com a rotina atual e a linha em vermelho a simulação preparada com a rotina desenvolvida neste trabalho.

Analisando as séries temporais, vemos que as diferenças mais significativas aparecem na região do ponto 1. Este ponto está localizado próximo a zona de frente, entre a corrente costeira e a corrente do Brasil (Figura (3.23 A)). Esta região, conforme observado na (Figura 3.22 C), indica as maiores discrepâncias associadas aos diferentes métodos empregados nas rotinas de geração de contornos. Por outro lado, os pontos 2 e 3 (Figura (3.23 B e (3.23 C)), apresentam diferenças menos significativas entre os dados calculados pelo modelo.

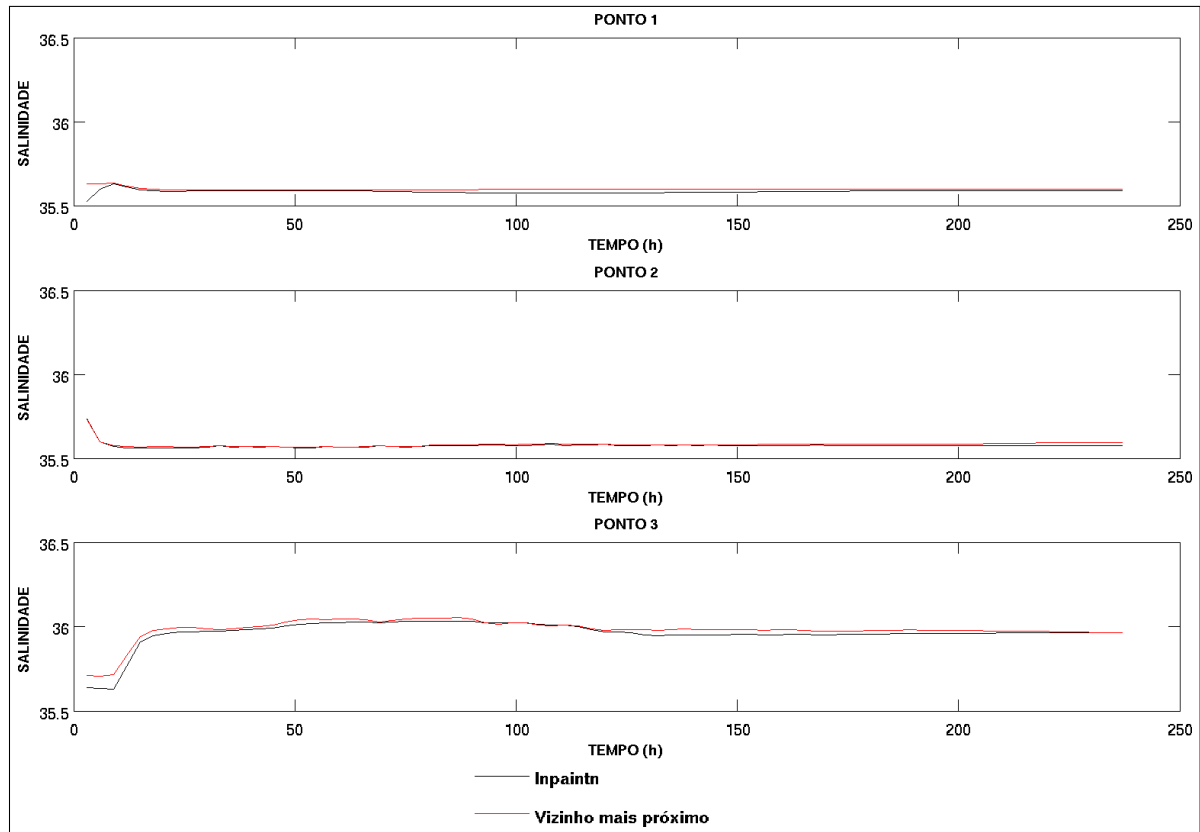


Figura 3.23: Séries temporais da salinidade da água do mar no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

É importante ressaltar que na rotina empregada neste trabalho não foi implementado um método de refino e interpolação vertical, de modo que, fosse aumentado o número de níveis entre cada camada a partir dos dados brutos do HYCOM. Esta implementação seria importante, pois permitiria a construção das condições de contorno oceânico do modelo TELEMAC3D de maneira mais realística. Desta forma, as maiores diferenças observadas nas variações temporais do campo de salinidade calculadas pelo modelo TELEMAC3D, quando comparadas com as variáveis atmosféricas, podem ser justificadas por esta menor suavização dos dados de contorno.

### Temperatura da Água do Mar

Os campos médios de temperatura da água do mar, são apresentados pela (Figura 3.24) para a camada sigma 10 do domínio numérico. As figuras da direita representam os campos de temperatura do modelo TELEMAC3D calculados com as diferentes roti-

nas de tratamento de dados. As escalas variam entre  $12^{\circ}\text{C}$ , para as temperaturas mais baixas, e  $22^{\circ}\text{C}$  para as mais altas. Neste caso, as cores em tons de azul, são as temperaturas mais baixas e, as que vão do verde até o vermelho escuro, representam as temperaturas mais altas.

Vê-se através destes resultados que a temperatura da água é mais fria na região oceânica, alcançando valores menores que  $15^{\circ}\text{C}$ . Enquanto que, junto à zona costeira, as temperaturas alcançam valores maiores que  $20^{\circ}\text{C}$ . Do ponto de vista geral, os resultados médios do modelo (Figura 3.24 A e 3.24 B) mostram as estruturas importantes da região, com a corrente do Brasil mais quente e seguindo em direção ao sul na região da Plataforma Continental. Além disso, é verificada a corrente dirigida por gradientes de densidade, com temperaturas sensivelmente menores, em torno de  $20^{\circ}\text{C}$ , seguindo em direção ao norte junto à zona costeira.

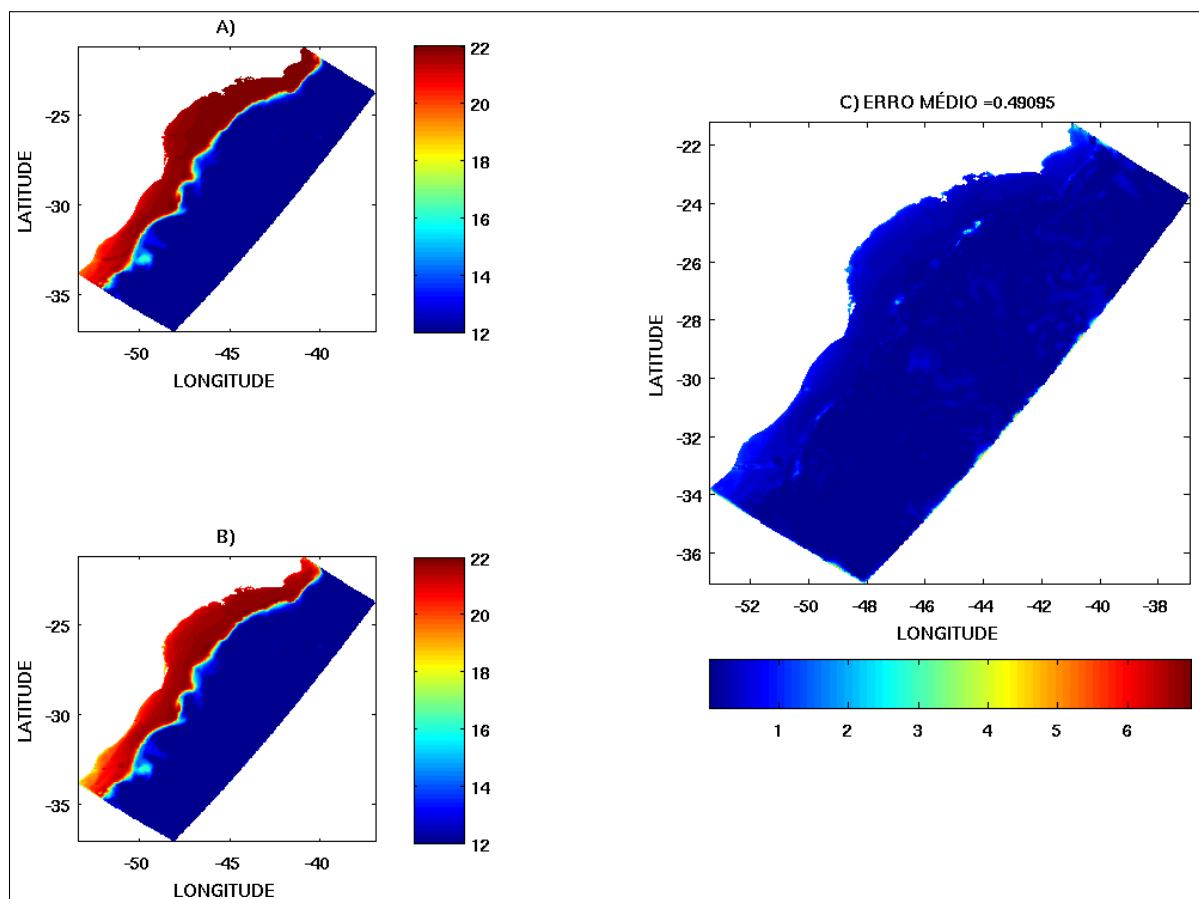


Figura 3.24: Comparação entre os campos médios de temperatura da água do mar na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014.

A (Figura 3.24 C) representa um mapa do erro absoluto médio calculado com base nos campos médios de temperatura, obtidos através do modelo TELEMAC3D. Observa-se que, os erros na região oceânica, são de maneira geral menores que  $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Já ao longo de toda a zona costeira, surgem alguns poucos pontos diferenciados, mesmo assim, com pequenas desigualdades. O diferente método de tratamento dos dados de condições de contorno, associado a cada uma das rotinas, propaga de forma diferenciada as variações de temperatura dos contornos e, parece ser mais significativa para esta variável do modelo. Por outro lado, as diferenças são razoáveis, dadas as escalas de variação do campo de temperatura e o baixo erro médio de  $0.49095$ .

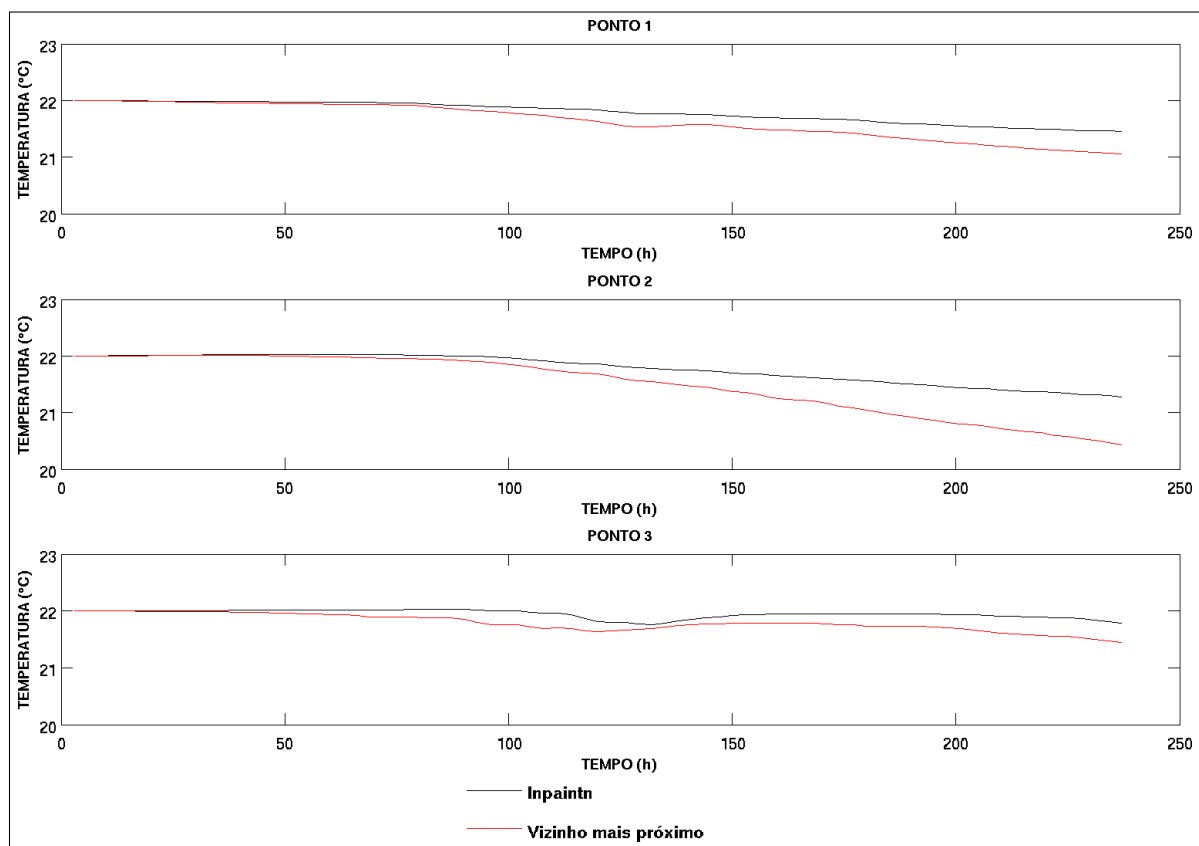


Figura 3.25: Séries temporais da temperatura da água do mar no nível sigma 10 obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

A (Figura 3.25) mostra as séries temporais para os 3 pontos da região de estudo. Estas séries foram obtidas entre 05 e 14 de julho de 2014, onde o eixo horizontal indica o tempo em horas e o vertical a temperatura da água do mar em  $^{\circ}\text{C}$ . As curvas em preto se referem à variável na simulação preparada com a rotina atual e as linhas em vermelho a variável na simulação preparada com a rotina desenvolvida neste trabalho.



As séries temporais de temperatura mostram um padrão diferente do observado no campo de salinidade. Podemos observar que as diferenças são significativas ao longo de toda a plataforma continental, de forma que aparecem em todos os pontos analisados. Esta região, conforme observado na (Figura 3.24 C), indica diferenças consideráveis, que podem ser associadas aos distintos métodos empregados nas rotinas de geração de contornos. Para o caso da temperatura da água do mar, parece que a implementação de um método de refino e interpolação vertical nos campos brutos provenientes do modelo HYCOM, são fundamentais para melhorar a construção das condições de contorno oceânicas do modelo TELEMAC3D. Desta forma, acredita-se que as maiores diferenças observadas nas variações temporais do campo de temperatura calculadas pelo modelo TELEMAC3D, podem ser reduzidas, considerando uma maior suavização dos dados de contorno.

### **Velocidade da Corrente: Componente U e Componente V**

Os campos médios de velocidade da corrente - componente U, são representados pela (Figura 3.26) e, a componente V, pela (3.27) para a camada sigma 10 do domínio numérico. As figuras da direita, se referem aos campos de velocidade do modelo TELEMAC3D, calculados com as diferentes rotinas de tratamento de dados. As escalas variam variam entre -0.1 à 0.15 m/s para a componente U, com as cores em tons de azul representando as componentes que vem de leste. Por outro lado, para a componente V, as escalas variam entre -0.2 e 0.2 m/s e as cores em tons de azul, indicam as componentes que vem de norte.

A partir destes mapas (Figura (3.26 A, (3.26 B, (3.27 A e (3.27 B) é possível perceber que as maiores intensidades de corrente ocorrem nas regiões do oceano aberto. Exceto em algumas regiões próximas a zona costeira, como por exemplo, a região próxima da cidade de Cabo Frio, no estado do Rio de Janeiro, onde se verifica áreas costeiras com grandes intensidades. Estas, são associadas à combinação de processos locais de circulação. Do ponto de vista geral, as principais feições oceanográficas são representadas em ambas as simulações numéricas, independentemente da rotina de tratamento utilizada na preparação das condições de contorno.

As (Figuras 3.26 C e 3.27 C) representam os mapas de erros absolutos médios calculados com base nos campos médios de velocidade de corrente obtidos através do

modelo TELEMAC3D. Na região oceânica, os erros absolutos são, de maneira geral, menores que 0.03 m/s. Os maiores erros, aparecem ao largo da zona costeira, na região da corrente do Brasil e nas regiões próximas aos contornos oceânicos. A propagação de erros, associada aos diferentes métodos de tratamentos dos dados de condições de contorno e, a cada uma das rotinas, parece ser menos significativa para esta variável do modelo quando comparada com a temperatura. Desta forma, foi identificado em cada umas das variáveis, erros médios abaixo de 0.005.

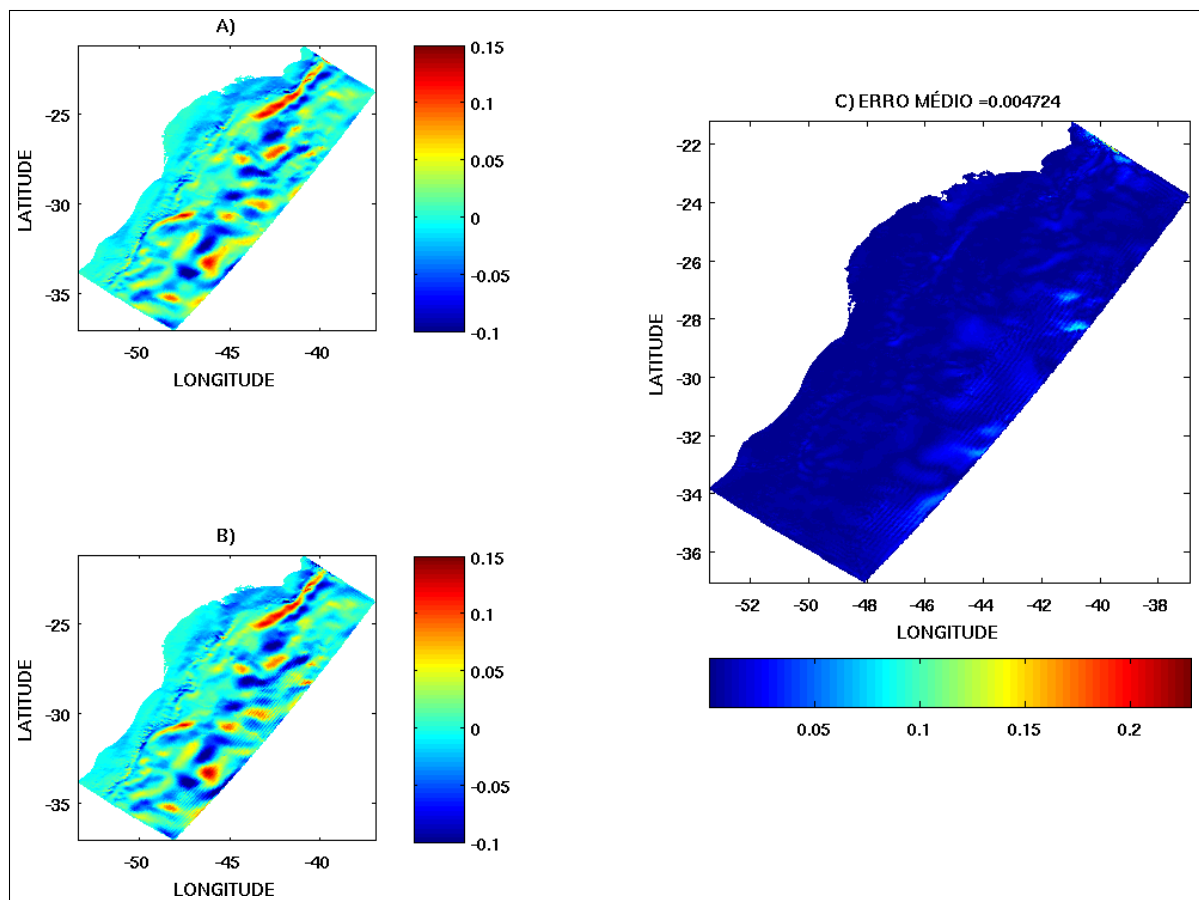


Figura 3.26: Comparação entre os campos médios de velocidade da corrente - componente U, na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014.

As (Figuras 3.28 e 3.29) mostram as séries temporais para os 3 pontos selecionados. Estas, foram obtidas entre 05 e 14 de julho de 2014, onde o eixo horizontal indica o tempo em horas e o vertical, indica a velocidade da corrente para cada uma das componentes em m/s. As curvas em preto representam a variável na simulação preparada com a rotina atual e, as linhas em vermelho, a variável na simulação preparada com a rotina desenvolvida neste trabalho.

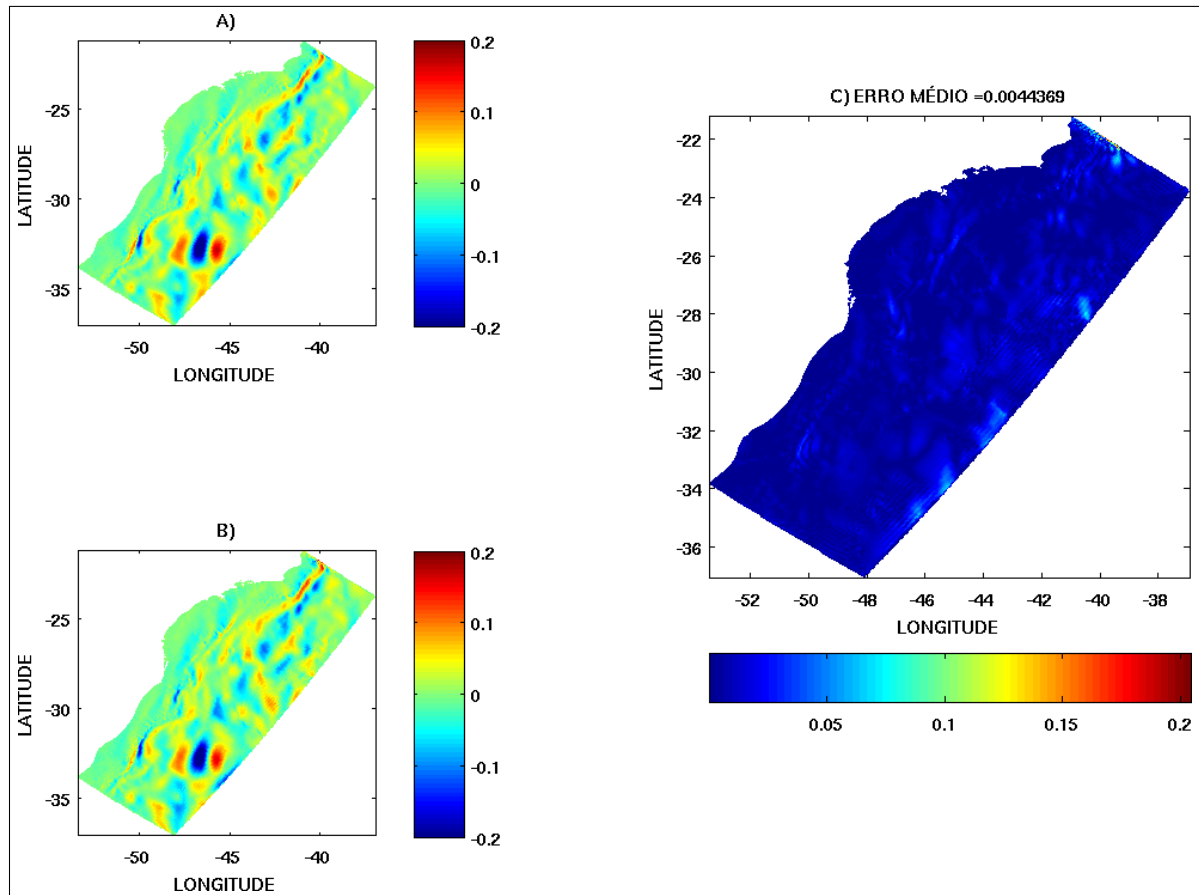


Figura 3.27: Comparação entre os campos médios de velocidade da corrente - componente  $V$ , na camada sigma 10, entre 05 e 14 de julho de 2014.

As séries temporais de velocidade de corrente mostram um padrão similar ao observado para o campo de temperatura. Neste caso, pode-se observar que as diferenças são significativas ao longo de toda a plataforma continental, de forma que aparecem em todos os pontos analisados. Estas séries indicam diferenças consideráveis, que podem ser associadas aos métodos empregados nas rotinas de geração de contornos, mas que do ponto de vista da média, acabam sendo pouco significativas. Novamente, parece que a implementação de um método de refino e interpolação vertical nos campos brutos provenientes do modelo HYCOM, podem contribuir para uma melhoria na construção das condições de contorno oceânicas do modelo TELEM3D.

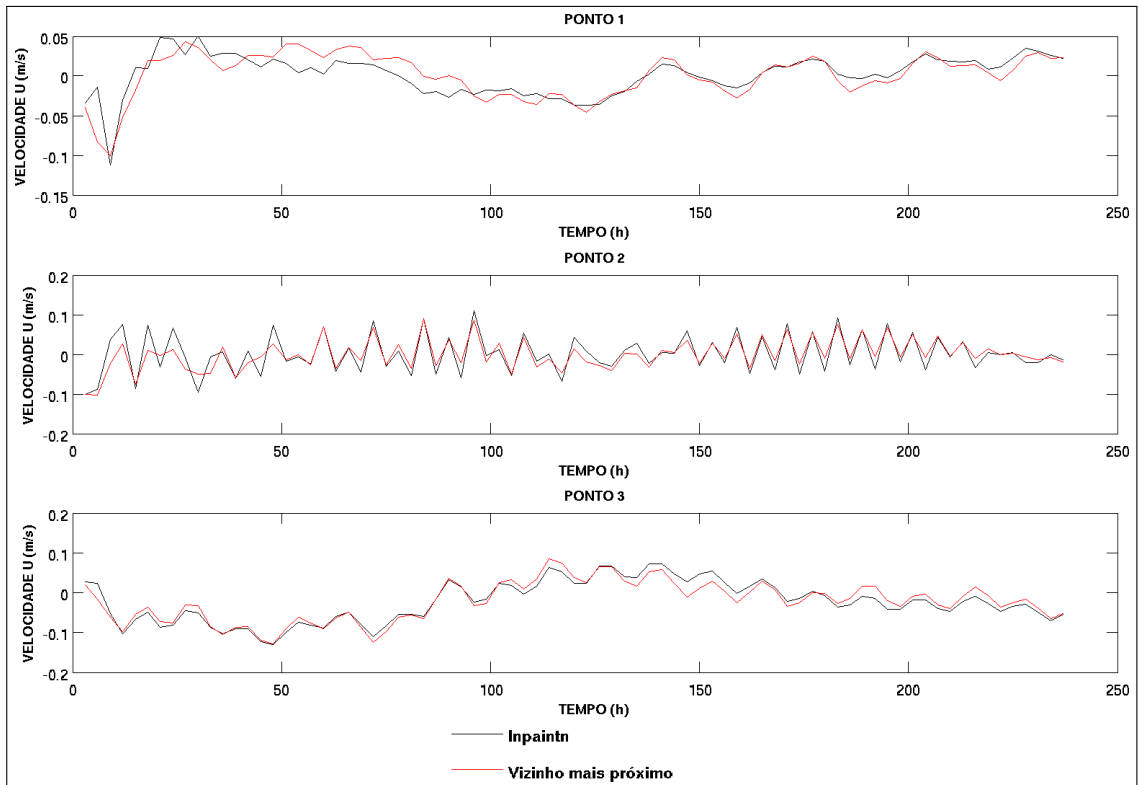


Figura 3.28: Séries temporais da velocidade da corrente - componente U, no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

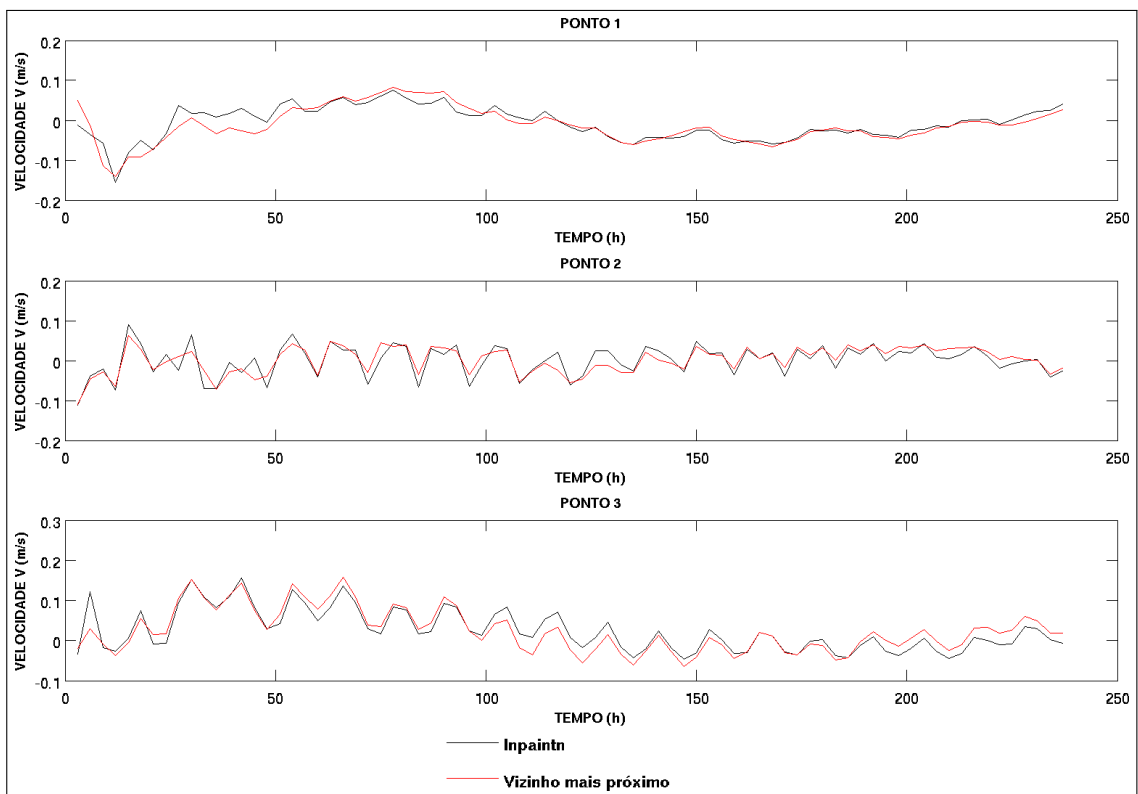


Figura 3.29: Séries temporais da velocidade da corrente - componente V no nível sigma 10, obtidas através da simulação numérica entre 5 e 14 de julho de 2014.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidas rotinas computacionais utilizando a linguagem de programação Python. Estas rotinas utilizam os resultados do modelo global HYCOM e dos programas de Reanalysis da NOAA para preparar condições iniciais e de contorno para o modelo TELEMAC3D. Assim, simulações numéricas hidrodinâmicas puderam ser realizadas. As rotinas de tratamento foram implementadas para tratar problemas relacionados à baixa resolução dos dados, a ausência de dados em regiões próximas à costa e, para a necessidade de interpolação para diferentes malhas batimétricas. Os resultados obtidos neste trabalho foram comparados com outra rotina de tratamento de dados que vem sendo utilizada atualmente no laboratório.

Desta forma, é possível destacar como principais conclusões:

- Com relação ao tratamento das variáveis, os problemas da ausência de dados, a necessidade de realizar interpolações para aumentar a resolução espacial e adaptação dos dados para a malha batimétrica do TELEMAC3D, foram resolvidos através do uso de interpoladores de vizinho mais próximo.
- Sobre as variáveis atmosféricas, podemos destacar que o tratamento de condições iniciais e de contorno realizadas pelas rotinas desenvolvidas neste trabalho ocorreu de forma satisfatória. A comparação dos resultados obtidos para o modelo TELEMAC3D, considerando as duas diferentes rotinas de tratamento de dados, indicou uma diferença média de: 3.923 hPa para a pressão atmosférica e de 0.059725 m/s para a intensidade do vento.

- A respeito das variáveis da água do mar, pode ser concluído que o tratamento de condições iniciais e de contorno foi realizado de forma adequada. Entretanto, a comparação dos resultados obtidos para o modelo TELEMAC3D, considerando as rotinas de tratamento de dados, indicou uma diferença média maior entre as variáveis calculadas. Para a salinidade da água do mar, foi observada uma diferença de 0.062673, de 0.49095 °C para a temperatura da água, de 0.004724 m/s para a componente U e de 0.0044369 m/s para a componente V da velocidade da corrente.
- As maiores diferenças observadas nas variáveis da água do mar, podem ser atribuídas a ausência de um interpolador vertical que possa ser utilizado para aumentar o número de níveis verticais do modelo HYCOM. Também deve ser levado em consideração a utilização futura de um interpolador mais sofisticado, de modo que realize o tratamento e preparação dos dados de condições iniciais e de contorno de maneira mais eficiente.

# Capítulo 5

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a conclusão deste trabalho, foram identificadas algumas questões que devem ser aprimoradas em desenvolvimentos futuros. Uma, está relacionada aos métodos de interpolação utilizados nos bancos de dados obtidos e, a outra, diz respeito à adoção do protocolo OpenDAP para realizar a recuperação dos dados que estão disponíveis em sites remotos.

- **Interpolador mais sofisticado:**

Desde o ano de 2006 o sistema de modelagem numérica TELEMAC vem sendo utilizado para a simulação de processos hidrodinâmicos, transporte de propriedades em suspensão, transporte de sedimentos e ondas na FURG (Barros et al., 2014), (Tavora et al., 2014), (Stringari et al., 2012), (Kirinus e Marques, 2012), (Marques et al., 2012), (Marques, 2011), (Marques et al., 2011), (Marques et al., 2010), (Marques et al., 2009). Desde então, o tratamento e preparação de dados para inicializar e forçar o sistema de modelagem, foram implementados e desenvolvidos através da utilização de métodos de interpolação por vizinho mais próximo.

No início do ano de 2015, um novo interpolador, conhecido como INPAINTN (Kirinus e Marques, 2015), (Kirinus et al., 2015), (Pezzato et al., 2015), foi aplicado ao código da rotina de tratamento de dados. Com o uso deste interpolador foi

possível perceber uma melhor resolução no tratamento dos dados utilizados para a alimentação do sistema TELEMAC. Além disso, foi observado um considerável ganho de custo computacional. Esta função trata tanto problemas de ausência de dados, como também de melhoria de resolução espacial e pode ser aplicada à matrizes de até três dimensões. Porém, o diferencial deste interpolador está nos métodos matemáticos: Função Ortogonal Empírica (EOF, *Empirical Orthogonal Function*) e Análise do Espectro Singular (SSA, *Singular Spectrum Analysis*), os quais são aplicados ao algoritmo. Segundo (Wang et al., 2012), estes métodos são os mais adequados, pois ambos utilizam fatores como espaço e tempo, trabalham em baixa frequência, permitindo assim, uma melhor previsão dos valores a serem preenchidos.

Nesta primeira versão do código desenvolvido em Python, foi implementado o método de interpolação por vizinho mais próximo. Conforme mencionado anteriormente, obtiveram-se bons resultados com um desempenho aceitável. No entanto, a partir do conhecimento e experiência adquirida ao longo deste trabalho, é necessário que a função INPAINTN do Python seja implementada como interpolador, objetivando uma melhor resolução e tratamento dos dados através de um método mais sofisticado.

- **Utilização do protocolo OpenDAP:**

O OpenDAP é um protocolo *open-source* destinado especificamente para dados científicos. Definido como um padrão aprovado e recomendado pela NASA, é baseado nas tecnologias HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) e MIME<sup>1</sup>, dos quais provê o transporte de dados gradeados multidimensionais, relacionais, em séries temporais e que atua através de uma rede de computadores (Earthdata, 2015).

Em modelos oceanográficos, são utilizados um grande volume de dados. Porém, com a utilização do protocolo OpenDAP, é possível requisitar e transportar apenas uma parte específica dos dados de interesse, evitando assim manipular um grande volume de dados (Rädler et al., 2012). Por exemplo: caso alguma instituição publique em seu site o resultado de um modelo numérico que possua 100 GB, não é necessário realizar o *download* de todo este arquivo para manipulá-lo localmente. É possível solicitar apenas dados de uma variável em uma determinada

---

<sup>1</sup>MIME, *Multipurpose Internet Mail Extensions* que se refere a um padrão da internet para o formato das mensagens de correio eletrônico.



localização e período. No caso de arquivos grandes, como os de formato NetCDF, os dados podem trafegar rapidamente, mesmo que esteja em uma localização remota e possua diversas variáveis, contendo milhões de registros (Rädler et al., 2012).

De forma resumida, podemos dizer que o OpenDAP funciona da seguinte forma: 1) Um computador local (cliente) acessa um endereço de um site (servidor) que contém um grande volume de dados oceanográficos. 2) Visando poupar tempo e tráfego na rede, algumas restrições são definidas na URL para limitar um subconjunto de dados. 3) Os dados são requisitados para o computador local e convertidos automaticamente para o formato padrão da aplicação do usuário. 4) Com os dados disponíveis na máquina do cliente, é possível preparar as simulações numéricas apenas com os dados que realmente são necessários.

A partir das vantagens relacionadas ao protocolo OpenDAP, pode ser aberta a oportunidade de realizar simulações em modo de previsão. Ou seja, devido ao rápido tráfego de dados via internet, é possível ter acesso a estes dados localmente, para serem tratados a tempo de fornecer informações importantes na tomada de decisões futuras.

Para pesquisas que envolvem estudos relacionados à previsão na área de oceanografia, as fontes de dados mais indicadas são: GFS e o RTOFS (*Real Time Ocean Forecast System*). Ambas são mantidas pela NOAA, possuem abrangência global, sendo que o primeiro gera dados atmosféricos e o segundo, dados oceanográficos. No caso do GFS, as previsões podem atingir até 16 dias (GFS, 2015) e, dentre as variáveis disponíveis para este modelo, pode-se citar: intensidade e direção do vento, temperatura do ar e precipitação. Por outro lado, o modelo RTOFS, consiste em uma implementação operacional do modelo HYCOM. Este, é executado uma vez por dia, produzindo 2 dias de *nowcast* e 6 dias de *forecast*. Os dados gerados por este modelo, correspondem às variáveis: temperatura e salinidade da água do mar, elevação do nível do mar e cobertura de gelo (RTOFS, 2015).

Contudo, para esta primeira versão desenvolvida nas rotinas do Python e, devido a experiência adquirida na manipulação e tratamento dos dados do HYCOM, foram feitas algumas requisições de teste ao site deste modelo, via protocolo OpenDAP. Logo, foi constatado que, de fato, o protocolo é bastante eficiente, pois o tráfego dos dados ocorreu de forma bem rápida e eficiente.

## Referências Bibliográficas

- ArcGIS-Pro (2015). Arcgis-pro - fundamentals of netcdf data storage. <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/multidimensional/fundamentals-of-netcdf-data-storage.htm>. Acessado em: 01/05/2015.
- Assad, L. P. d. F., Mano, M. F., Decco, H. T. d., Júnior, A. R. T., e Landau, L. (2009). *Curso de Noções Básicas de Modelagem Hidrodinâmica Computacional e de Dispersão de Poluentes*.
- Barros, G. P. D., Marques, W. C., e Kirinus, E. D. P. (2014). Influence of the Freshwater Discharge on the Hydrodynamics of Patos Lagoon, Brazil. *Scientific Research*, 2014(August):925–942.
- Bastos, C. C. e Ferreira, N. J. (2000). Análise climatológica da alta subtropical do atlântico sul. *CEP*, 12220:110.
- Best, D. M. e Lewis, R. R. (2010). GWVis A tool for comparative ground-water data visualization. *Computers and Geosciences*, 36(11):1436–1442.
- Blower, J. D., BLANc, F., Clancy, R., Cornillon, P., Donlon, C., Hacker, P., Haines, K., Hankin, S. C., Loubrieu, T., Pouliquen, S., et al. (2009). Serving godae data and products to the ocean community. *Oceanography*, 22(3):70–79.
- Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R., Gussow, K., Khalilian, S., Krastel, S., Kortzinger, A., Langenbuch, M., Latif, M., Matthiessen, B., Melzner, F., Oeschies, A., Petersen, S., Proels, A., Quaas, M., Reichenbach, J., Requate, T., Reusch, T., Rosenstiel, P., Schmidt, J. O., Schrottke, K., Sichelschmidt, H., Siebert, U., Soltwedel, R., Sommer, U., Stattegger, K., Sterr, H., Sturm, R., Treude, T., Vafeidis, A., van Bernem, C., van Beusekom, J., Voss, R., Visbeck, M., Wahl, M., Wallmann, K., e Weinberger, F. (2010). World Ocean Review.

- Cirano, M., Mata, M. M., Campos, E. J., e Deiró, N. F. (2006). A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do atlântico sul com base no modelo de circulação global occam. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(2):209–230.
- Colling, A. (2001). *Ocean circulation*, volume 3. Butterworth-Heinemann.
- Cornillon, P., Adams, J., Blumenthal, M. B., Chassignet, E., Davis, E., Hankin, S., Kinter, J., Mendelsohn, R., Potemra, J. T., Srinivasan, A., et al. (2009). Nvods and the development of opendap. *Oceanography*.
- Cuchiara, D. C., Fernandes, E., Strauch, J. C., Winterwerp, J. C., e Calliari, L. J. (2009). Determination of the wave climate for the southern brazilian shelf. *Continental Shelf Research*, 29(3):545–555.
- da Rocha Fragoso, M. (2004). *Um Modelo Numérico Da Circulação Oceânica Para As Bacias Leste E Sudeste Do Brasil*. PhD thesis, Universidade Federal Do Rio De Janeiro.
- de Almeida, E. S., do Ó Filho, E. F., e Carvalho, L. d. S. M. (2001). Acesso e manipulação de dados observacionais através do metview utilizando o banco de dados meteorológicos do cptec/inpe. CD-ROM. (INPE-13484-PRE/8697).
- de Carvalho, J. d. S. (2014). Variabilidade de longo-termo do transporte da corrente do brasil ao longo de 30 s: Um estudo numérico. Master's thesis, Universidade de São Paulo.
- Desombre, J. (2013). *Telemac Modelling System - 3D Hydrodynamics*. EDF RD.
- Douglas, D. C. (2011). Sources of global climate data and visualization portals. *homepage*: <http://dx.doi.org/10.4080/gpcw.2011.0110>, Volume I:101–116.
- Earthdata (2015). The data access protocol - dap 2.0. <https://earthdata.nasa.gov/standards/data-access-protocol-2>. Acessado em: 13/03/2015.
- ESRL (2015). Physical sciences division (psd). <http://www.esrl.noaa.gov/psd/about/>. Acessado em: 21/04/2015.
- Flather, R. A. (1976). Results from surge prediction model of the North-West European continental shelf for April, November and December 1973. Technical report, Institute of Oceanography (UK), Report n° 24.

- Gaither, K. e Moorhead, R. J. (2002). Visualizing Vector Information in Ocean Environments. *Robert J. Moorhead Engineering Research Center for Computational Field Simulation*, page 8.
- Galiano, V., Migallón, H., Migallón, V., e Penadés, J. (2010). PyPnetCDF: A high level framework for parallel access to netCDF files. *Advances in Engineering Software*, 41(1):92–98.
- GFS (2015). Global forecast system. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>. Acessado em: 23/01/2016.
- Hackett, B., E. C. P. D. e Ichikawa, H. (2009). Marine oil pollution prediction. *Oceanography*, 22(3):168–175.
- Halliwel, G. (2002). HYCOM Overview. (February):5.
- Hervouet, J. M. (2007). *Free surface flows: Modelling with the finite element methods*.
- Hervouet, J. M. e Van Haren, L. (1996). Recent advances in numerical methods for fluid flows. In Anderson, M. G., Walling, D. E., e Bates, P. D., editors, *Floodplain processes*, pages 183–214. Wiley, Chichester.
- HYCOM (2015). Hycom - hybrid coordinate ocean model. <http://hycom.org/>. Acessado em: 14/04/2015.
- IBGE (2015). Mapa físico do brasil. <http://teen.ibge.gov.br/mao-na-roda/posicao-e-extensao>. Acessado em: 12/03/2015.
- Idris, I. (2013). *NumPy Beginner's Guide*. Packt Publishing Ltd.
- Iescheck, A. L., Sluter, C. R., e Ayup-Zouain, R. N. (2008). Interpolação qualitativa de dados espaciais. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 14(4):523–540.
- IQuOD (2015). International quality-controlled ocean database. <http://www.iquod.org/index.php/about>. Acessado em: 02/03/2015.
- Kampel, M. (2002). Sensoriamento remoto aplicado à oceanografia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Kirinus, E. D. P. e Marques, W. C. (2012). The Contribution of Waves in Mixing Processes of the Patos Lagoon Plume 1. *Scientific Research*, 2012(November):1019–1026.

- Kirinus, E. d. P., Marques, W. C., Jung, B. M., Stringari, C. E., e Matzenauer, H. B. (2015). Evaluating current power availability for energy conversion along the Southern Brazilian Shelf. *International Journal of Marine Energy*, 10:97–112.
- Kirinus, E. P. e Marques, W. C. (2015). Viabilidade do uso de turbinas hidrocínéticas na Plataforma Continental Sul-Sudeste Brasileira. *Scientia Plena*, 11:1–10.
- Kirinus, E. P., Marques, W. C., e Stringari, C. E. (2012). Viabilidade de conversão da energia de correntes marinhas na Plataforma Continental Sul do Brasil. *Vetor*, 22((in press)).
- Kistler, R., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Kalnay, E., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., et al. (2001). The ncep-ncar 50-year reanalysis: Monthly means cd-rom and documentation. *Bulletin of the American Meteorological society*, 82(2):247–267.
- Lima, L. N. (2012). Estudo do impacto da assimilação de dados altimétricos na previsibilidade de curto-prazo do modelo oceânico hycom sobre a metarea v do oceano atlântico sul. Master's thesis, Universidade Federal da Bahia.
- Malensek, M., Pallickara, S. L., e Pallickara, S. (2013). Exploiting geospatial and chronological characteristics in data streams to enable efficient storage and retrievals. *Future Generation Computer Systems*, 29(4):1049–1061.
- Marques, W. C. (2011). The Exchange Processes in the Patos Lagoon Estuarine Channel, Brazil. *International Journal of Geosciences*, 02(03):248–258.
- Marques, W. C., Fernandes, E., Monteiro, I. O., e Möller, O. (2009). Numerical modeling of the patos lagoon coastal plume, brazil. *Continental Shelf Research*, 29(3):556–571.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Malcherek, A., e Rocha, L. A. O. (2012). Energy converting structures in the Southern Brazilian Shelf: Energy Conversion and its influence on the hydrodynamic and morphodynamic processes. *Journal of Geophysical Research*.
- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., Moraes, B. C., Möller, O. O., e Malcherek, A. (2010). Dynamics of the Patos Lagoon coastal plume and its contribution to the deposition pattern of the southern Brazilian inner shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(10):1–22.

- Marques, W. C., Fernandes, E. H. L., e Rocha, L. a. O. (2011). Straining and advection contributions to the mixing process in the Patos Lagoon estuary, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(3):1–11.
- Marta-Almeida, M., Ruiz-villarreal, M., Otero, P., Cobas, M., Peliz, A., Nolasco, R., Cirano, M., e Pereira, J. (2011). OOF $\epsilon$ : A Python engine for automating regional and coastal ocean forecasts. *Environmental Modelling and Software*, 26(5):680–682.
- Marta-Almeida, M., Ruiz-Villarreal, M., Pereira, J., Otero, P., Cirano, M., Zhang, X., e Hetland, R. D. (2013). Efficient tools for marine operational forecast and oil spill tracking. *Marine Pollution Bulletin*, 71(1-2):139–151.
- Mayerle, R., Jaramillo, J. F., Salama, A., Bruss, G., Zubier, K., Runte, K., Turki, A., Hesse, K., Jastania, H., Ladwig, N., e Mudarris, M. (2015). Development of a Coastal Information System for the Management of Jeddah Coastal Waters in Saudi Arabia. *Computers and Geosciences*.
- Miller, C. T., Dawson, C. N., Farthing, M. W., Hou, T. Y., Huang, J., Kees, C. E., Kelley, C. T., e Langtangen, H. P. (2013). Numerical simulation of water resources problems: Models, methods, and trends. *Advances in Water Resources*, 51:405–437.
- Moises, W. V. E. A. D., Cirne, S. W., e Banerjee, S. B. S. (2006). Towards an open and scalable data grid solution for environmental sciences. <https://intranet.dcc.ufba.br/pastas/gaudi/biometrica/papers/grid/towards-scalable-open-data-grid-for-earth-sciences-v13.pdf>, pages 1–13.
- Namikawa, L. M. (1995). Um método de ajuste de superfície para grades triangulares considerando linhas características. Master's thesis, INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Oliphant, T. E. (2007). Python for Scientific Computing. *Computing in Science & Engineering*, pages 10–20.
- Pérez F., Granger B. E., H. J. D. (2011). Python: An Ecosystem for Scientific Computing. *Computing in Science & Engineeng*, pages 13–21.
- Pezzato, B. C., Kirinus, E. P., e Marques, W. C. (2015). Estudo da hidrodinâmica de diferentes geometrias de sítios de conversão de energia das correntes. *Scientia Plena*, 11:1–8.

- Quadro, M., Machado, L., Calbete, S., Batista, N., e Oliveira, G. d. (1996). Climatologia de precipitação e temperatura. *Climanálise (Boletim de Monitoramento e Análise Climática), Especial de*, 10. <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rcliman1/boletim/cliesp10a/chuesp.html>.
- Rädler, J., Ljubijankic, M., Nytsch-Geusen, C., e Huber, J. (2012). Accessing external data on local media and remote servers using a highly optimized file reader library. In *Proceedings of the 9th International Modelica Conference*, volume 3.
- Reanalysis (2015). Ncep/ncar reanalysis 1. <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/grid-ded/data.ncep.reanalysis.html>. Acessado em: 21/04/2015.
- Relvas, P. (2015). Oceanografia física: Introdução. [http://w3.ualg.pt/prelvas/Oceanog-Fisica/Oce\\_Fisica\\_Introducao.pdf](http://w3.ualg.pt/prelvas/Oceanog-Fisica/Oce_Fisica_Introducao.pdf). Acessado em: 02/03/2015.
- Rodi, W. (1984). Turbulence models and their applications in hydraulics. A state of the art review. *Edition AIRH*.
- Rodrigues, L. (2008). Wave power conversion systems for electrical energy production. *Nova university of Lisbon*.
- Rossi-Wongtschowski, C. L. D. B. e Madureira, L. S. P. (2006). *O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região sudeste-sul do Brasil*. EdUSP.
- RTOFS (2015). The global rtofs ocean model. <http://polar.ncep.noaa.gov/global/about>. Acessado em: 23/01/2016.
- Rädler, J., Ljubijankic, M., Nytsch-Geusen, C., e Huber, J. (2012). Accessing external data on local media and remote servers using a highly optimized file reader library. In *Berlin University of the Arts / Universität der Künste Berlin (UdK)*. Munich, Germany.
- Saldanha, C. B., Fedorova, N., e Carvalho, M. H. d. (2010). Estudo de um caso de frente fria secundária sobre o sul do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(1).
- Schmiegelow, J. (2004). *O Planeta azul: uma introdução as ciências marinhas*. Interciência.
- Signell, R. P., Carniel, S., Chiggiato, J., Janekovic, I., Pullen, J., e Sherwood, C. R. (2008). Collaboration tools and techniques for large model datasets. *Journal of Marine Systems*, 69:154–161.

- Silva, F. C. C. d. (2014). Workflow para mapeamento de dados oceanográficos no Brasil. In *I Seminário Internacional de Preservação Digital*, Brasília, DF. Acessado em: 17/11/2015.
- Silva, N. R. (2006). Visualização 3d de dados oceanográficos simulados. Mestrado, Programa De Pós-Graduação Em Ciência De Computação, Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul, Puc-RS.
- Silveira, I. C. A. d., Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. d., e Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Revista Brasileira de Oceanografia*, 48(2):171–183.
- Stewart, R. H. (2008). *Introduction To Physical Oceanography*. Department of Oceanography Texas A M University.
- Stringari, C. E., Marques, W. C., Mello, L. F., e Edit, R. T. (2012). Modeling the wind influence in an oil spill along the southern Brazilian shelf. *Thermal Engineering*, 11(1):100–109.
- Sweers, U. (1976). Monograms to estimate the heat-exchange coefficient at the air-water interface as a function of wind speed and temperature; a critical survey of some literature. *Journal of Hydrology*, 30:375–401.
- Tavora, J., Pereira, B., Kirinus, E. D. P., Marques, W. C., Borges, T., Gandra, R., Barros, G. P. D., e Matzenauer, H. B. (2014). Exploring the Project Potential of Marine Current Turbines: A Case Study in the Southern Brazilian Shelf Region. *Scientific Research*, 2014(December):1547–1560.
- Tomczak, M. e Godfrey, J. S. (2003). *Regional Oceanography: an Introduction*. Daya Publishing House.
- Trenberth, K. E. e Caron, J. M. (2001). Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *Journal of Climate*, 14(16):3433–3443.
- Unidata (2015). Unidata project python. <http://www.unidata.ucar.edu/projects/index.html>. Acessado em: 09/03/2015.
- Wallcraft, A. J., Hurlburt, H. E., Metzger, E. J., Cummings, J., Chassignet, E. P., Smedstad, O. M., et al. (2007). Global ocean prediction using hycom. In *DoD High Perfor-*



*mance Computing Modernization Program Users Group Conference, 2007*, pages 259–262. IEEE.

Wang, G., Garcia, D., Liu, Y., Jeu, R. D., e Dolman, A. J. (2012). A three-dimensional gap filling method for large geophysical datasets: Application to global satellite soil moisture observations. *Environmental Modelling and Software*, 30:139–142.

Wellmann, J. F., Croucher, A., e Regenauer-lieb, K. (2012). Python scripting libraries for subsurface fluid and heat flow simulations with TOUGH2 and SHEMAT. *Computers and Geosciences*, 43:197–206.

WOCE (2015). World ocean circulation experiment global data resource. [http://www.nodc.noaa.gov/woce/wdiu/utils/netcdf/netcdf\\_primer/why\\_netcdf.htm](http://www.nodc.noaa.gov/woce/wdiu/utils/netcdf/netcdf_primer/why_netcdf.htm). Acessado em: 07/03/2015.