



Anais Hidrográficos



Navio Hidrográfico "Sirius"
"Escola de Hidrografia"

**64 ANOS DE SERVIÇOS PRESTADOS
À MARINHA DO BRASIL (1958-2022)**

Tomo LXXIX • 2022



ISSN 0373-9260



MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

ANAIIS HIDROGRÁFICOS

REVISTA ANUAL DA DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

TOMO LXXIX

BRASIL

Anais Hidrográficos	Rio de Janeiro	T. 79	p. 1-284	2022
---------------------	----------------	-------	----------	------

ANAIS HIDROGRÁFICOS – Publicação anual da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil, cujo propósito é manter os hidrógrafos e a comunidade científica marítima informados sobre as atividades desenvolvidas pela DHN, bem como divulgar, por meio de artigos técnico-científicos, os diversos assuntos conduzidos no âmbito desta Diretoria.

EDIÇÃO – Superintendência de Capacitação de Pessoal e Gestão do Conhecimento.
CONSELHO EDITORIAL da DHN.

Os trabalhos originais e inéditos aqui publicados são de propriedade da DHN e de seus autores. Portanto, só podem ser reproduzidos, em parte ou no todo, com a expressa autorização de ambas as partes. Os conteúdos dos artigos são de responsabilidade dos autores, não constituindo necessariamente a opinião da DHN.

AOS AUTORES – A revista aceita colaboração, na forma de trabalhos originais e inéditos ou de resumos informativos e resenhas críticas de teses, artigos técnico-científicos, conclave ou palestras relativas à Hidrografia, Navegação, Sinalização Náutica, Oceanografia, Geologia e Geofísica Marinha e Meteorologia Marinha. As colaborações devem ser entregues digitadas em meio digital no editor de texto MS Word for Windows e as imagens enviadas em arquivo separado com resolução de no mínimo 300dpi, acompanhadas dos originais, à Superintendência de Capacitação de Pessoal e Gestão do Conhecimento até a 1ª quinzena de março. O texto dos originais deve ter entre 250 e 500 linhas e o das resenhas/resumos entre 75 e 150 linhas. Na confecção dos artigos deve-se seguir as seguintes Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): NBR 6021, NBR 6022, NBR 6023, NBR 6024, NBR 6027, NBR 6028, NBR 10520 e NBR 14724. As referências bibliográficas devem ser apresentadas em lauda separada. Os trabalhos devem ser acompanhados de um sumário, com o máximo de 10 linhas, e do currículo do autor, com até 5 linhas, iniciando-se pelo seu nome.

ANAIS HIDROGRÁFICOS

Diretoria de Hidrografia e Navegação
Rua Barão de Jaceguai s/n
24048-900 – Niterói, RJ – BRASIL
Email: dhn.secom@marinha.mil.br

© Diretoria de Hidrografia e Navegação – Marinha do Brasil. 2023.

A532 Anais Hidrográficos / Diretoria de Hidrografia e Navegação.
2022 Rio de Janeiro: A Diretoria, 1933 –
t. 79, p. 1-284 : il., graf.

Anual

ISSN 0373-9260

1. Hidrografia I – Brasil. Diretoria de Hidrografia e
Navegação.

APRESENTAÇÃO

É com grande honra que apresento o Tomo LXXIX dos Anais Hidrográficos, coletânea dos principais trabalhos desenvolvidos pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e Organizações Militares subordinadas ao longo de 2022, nos campos da Hidrografia, Navegação, Cartografia Náutica, Meteorologia Marinha, Oceanografia, Geologia e Geofísica Marinhas e Auxílios à Navegação. Tradicionalmente lançado em 28 de setembro, para celebrar o Dia do Hidrógrafo, este ano, o periódico homenageia também um dos meios navais com mais dias de mar contabilizados na história da Marinha do Brasil (MB), conhecido como “Escola de Hidrografia”: o Navio Hidrográfico (NHi) Sirius.

Após mais de 64 anos de lides hidrográficas, o (NHi) Sirius deixou o serviço ativo em 16 de março de 2022, alcançando a marca de 843.666 milhas náuticas navegadas e 4.575 dias de mar. Incorporado à MB em 17 de janeiro de 1958, teve sua trajetória marcada pelo pioneirismo e pelo caráter formador. Foi o primeiro navio construído e equipado especificamente para as atividades de Hidrografia e o primeiro a realizar a bordo um pouso de aeronave no âmbito da Marinha do Brasil. Além disso, tornou-se referência na formação de diversas gerações de hidrógrafos, que puderam adquirir experiência para a execução de Levantamentos Hidroceanográficos de interesse para o Brasil. Navio longo e “de alma”, que continua navegando na memória de suas tripulações.

Do enaltecimento aos exemplos do passado à valorização da atuação presente, que inspiram o futuro, esta edição é aberta com a Aula Inaugural do 75º Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais, ministrada pelo Secretário da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar, Oficial Hidrógrafo, Contra-Almirante Marco Antônio Linhares Soares. Nas seções seguintes, são apresentadas informações sobre a produção cartográfica e de outras publicações náuticas desenvolvidas pelo Centro de Hidrografia da Marinha e impressas pela Base de Hidrografia da Marinha em Niterói; o Programa de Conclaves e Intercâmbios, Cursos e Estágios em Instituições Extra-MB e Cursos Regulares dos quais participam nossos militares e servidores civis; as Comissões realizadas pelos navios do Grupamento de Navios Hidroceanográficos e dos Centros de Hidrografia e Navegação e pelos Serviços de Sinalização Náutica; e as nossas Efemérides Hidrográficas de 2022. Por fim, na seção Artigos Científicos, destacam-se recentes contribuições acadêmicas nas diferentes áreas de interesse do serviço hidrográfico.

Por meio destes Anais Hidrográficos, convido-os, assim, a conhecer parte do trabalho de excelência conduzido por nossa tripulação no último ano, atuando com dedicação e comprometimento, em prol da salvaguarda da vida humana, do desenvolvimento nacional e da aplicação do Poder Naval. Boa leitura!



CARLOS ANDRÉ CORONHA MACEDO
Vice-Almirante
Diretor de Hidrografia e Navegação

SUMÁRIO

- 6** **PRINCIPAIS CARGOS E FUNÇÕES
AO FINAL DO ANO DE 2022**
- 13** **AULA INAUGURAL PARA A 75ª TURMA DO CURSO DE
APERFEIÇOAMENTO DE HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS (CAHO)
PROFERIDA PELO CONTRA-ALMIRANTE MARCO ANTÔNIO
LINHARES SOARES**
- 20** **I – PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA**
- 21** **II – PROGRAMA DE CONCLAVES E INTERCÂMBIOS**
- 24** **III – CURSOS E ESTÁGIOS EM INSTITUIÇÕES EXTRAMARINHA**
- 25** **IV – CURSOS REGULARES**
Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais (CAHO)
Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação (C-Ap-HN)
Curso de Aperfeiçoamento de Faloreiro (C-Ap-FR)
- 33** **V – COMISSÕES**
- 88** **VI – ARTIGOS**
- ANÁLISE DA TENDÊNCIA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR
E FLUXOS DE CALOR NO ATLÂNTICO SUDOESTE ENTRE OS ANOS DE
1959 E 2020**
Primeiro-Tenente Pedro Henrique Ainsworth de Oliveira e Souza
D.Sc. Fabíola Valéria Barreto Teixeira
- 107** **ANÁLISE DOS PARÂMETROS DESCRITIVOS DE ONDA COLETADOS
POR ONDÓGRAFO DE PRODUÇÃO NACIONAL**
M.Sc. Pedro Octavio Foloni Sousa
Capitão de Corveta Elias de Castro Nadaf
Leonardo Ferraz Garcia
D.Sc. Luiz Alexandre A. Guerra
D.Sc. André L. T. Mendes
- 123** **ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS BRUTOS DO MARÉGRAFO DE
PRESSÃO PARA UTILIZAÇÃO EM LEVANTAMENTOS HIDROCEANO-
GRÁFICOS POR MEIO DE UMA SÉRIE TEMPORAL DE UMA SEMANA
NO COMPLEXO NAVAL DA PONTA DA ARMAÇÃO**
Capitão de Corveta Elias de Castro Nadaf
M.Sc. Gregório Luiz Galvão Teixeira
M.Sc. Pedro Octavio Foloni Sousa
Leonardo Araujo Costa
Leonardo Ferraz Garcia
Capitão de Mar e Guerra (RM1) Heraldo Soares Caldeira
- 133** **ASPECTOS GERAIS DOS CICLONES TROPICAIS E SUBTROPICAIS
OCORRIDOS NA METAREA V ENTRE 2011 E 2022**
Primeiro-Tenente (T) Fellipe Romão Sousa Correia
Segundo-Sargento (ME) Felipe Garcez de Queiroz
Terceiro-Sargento (ME) Pamella Sampaio Nascimento Amaro

155

BATIMETRIA DERIVADA POR SATÉLITE BASEADA EM ABORDAGEM DE SEGMENTAÇÃO GEOGRÁFICA

Capitão-Tenente (EN) Juliane Jussara Affonso

167

EMPREGO DAS FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS NA TOMOGRAFIA ACÚSTICA OCEÂNICA

Capitão de Corveta Rodrigo Soares de Freitas
Capitão de Mar e Guerra Vicente Barroso Junior
Capitão de Fragata (T) Rogério de Moraes Calazan

179

ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, EM PRAIA COM AMBIENTE DE MESOMARÉ, UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS

Capitão-Tenente (EN) Edico Ramon de Melo
Capitão de Corveta Guilherme Antonio Gomes do Nascimento

191

IMPACTO DA MARÉ METEOROLÓGICA NO NÍVEL DO MAR PARA A BAÍA DE SEPETIBA-RJ

Eduarda Pinto Borba
M.Sc. Gregório Luiz Galvão Teixeira
Alessandro Mendonça Filippo

201

METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA MEDIÇÃO DE OFF-SET DE EMBARCAÇÃO COM SISTEMA MUTIFEIXE

Capitão de Corveta Bruno Neves Baptista

216

MIGRAÇÃO DE ONDAS DE AREIA NAS PROXIMIDADES DE MARTHA'S VINEYARD, MASSACHUSETTS, EUA

Capitão de Corveta Vinícius Santos Pessanha

242

MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2D DA REGIÃO COSTEIRA DE CABO FRIO/RJ EM APOIO AO SISTEMA TÁTICO DE FATORES AMBIENTAIS – STFA

Capitão de Corveta (RM3-T) Marcos Henrique Maruch Tonelli
Capitão de Corveta (RM3-T) Victor Bastos Daher
Capitão de Corveta (EN) Thiago Silva Baron
Primeiro-Tenente (T) Fernando Ribeiro
MSc Augusto Pereira
Capitão de Fragata (T) Marcia Helena Moreira Valente

252

POSICIONAMENTO COM CORREÇÃO EM TEMPO REAL OU PÓS-PROCESSADO: QUAL O MELHOR CUSTO-BENEFÍCIO PARA REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GNSS?

Capitão-Tenente Felipe Rodrigues Santana
Claudia Pereira Kruege
Érica Santos Matos Baluta
Capitão de Corveta Elias de Castro Nadaf

272

VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADO EXPERIMENTAL – VSNT-E: UMA AVALIAÇÃO OPERACIONAL À LUZ DA HIDROGRAFIA

Primeiro-Tenente Thiago Zamith Cunha;
Capitão de Mar e Guerra (RM1) Cláudio Coreixas de Moraes
Capitão de Corveta André Ribeiro Bretinger

280

VII – EFEMÉRIDES HIDROGRÁFICAS

Grupamentos de Navios Hidroceanográficos
Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino
Centro de Hidrografia da Marinha
Centro de Auxílios à Navegação Almirante Moraes Rego

ANAIIS HIDROGRÁFICOS

Publicação anual, produzida e editada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação e editada pelo Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino localizado na Rua Barão de Jaceguai, s/nº. Ponta da Armação. CEP 24048-900 – Niterói – RJ

Diretor

VAIté Carlos André Corona Macedo

Presidente do Conselho Técnico

CMG Paschoal Mauro Braga Mello Filho

Coordenador

CMG (RM1) Wagner Luiz Honorato Pereira

Editores

CMG (RM1) Leonardo Diogo da Silva
CF (T) Gisele dos Santos Alves
1ª SG-HD Andrea B. Fagundes F. M. de Lima
2ª SG-HN Jeferson Brião Oliveira

Revisão

Revisores Técnicos

Capitão de Mar e Guerra Heraldo Soares Caldeira
Capitão de Fragata Anderson Barbosa da Cruz Peçanha
Capitão de Corveta Bruno Neves Baptista
Capitão de Corveta Rodrigo de Souza Barreto Mathias
Capitão de Corveta (EN) Eduardo Esteves Vale
Capitão de Corveta Marcus Vinicius Mendes
Capitão-Tenente Flávio Alves da Cunha Silva
Capitão-Tenente (T) André Luiz Araujo Damião
Primeiro-Tenente (T) Kaio Calmon Lacerda
Primeiro-Tenente (EN) Mariane dos Santos Pessanha
Professor Doutor Geraldo Nogueira
Professor Doutor Alexandre Luiz Coelho
Professora Doutora Fabíola Valéria Barreto Teixeira
Professor Mestre Gregório Luiz Galvão Teixeira

Revisores ortográficos dos artigos científicos

Primeiro-Tenente (RM2-T) Caroline Souza
Primeiro-Tenente (RM2-T) Juliana Neto
Professor Mestre Mário da S. Souza
Professor Doutor Victor Hugo B. Ramalho
Professora Doutora Maria Helena Mendonça

Revisora ortográfica das seções:

"Comissões" e "Efemérides"
Primeiro-Tenente (RM2-T) Gabriela Amaral de Rezende

Planejamento/Infográfico do Síríus

1T (RM2-T) Raiane Nogueira Gama
1ªSG-ET Gustavo de Macedo Silva
1ªSG-CP Carlos Diego Fonteles de Oliveira
3ªSG-CN Diogo Sales Sueira

Projeto Gráfico e Editoração

SC Adriana de Jesus Matos
SC Marcos Mendonça de Moraes
1ªSG-GR Márcia Gnutzmann Peter
CB-GR Valter Luiz da Silva Santos
CB-GR João Gabriel da Silva
CB-GR Lais Almeida da Silva

Capa

Departamento Industrial Gráfico da BHMN
SC Marcos Mendonça de Moraes



visite os Anais Hidrográficos em:
<https://www.marinha.mil.br/dhn/>

PRINCIPAIS CARGOS AO FINAL DO ANO DE 2022

DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO

Diretor
Vice-Almirante
Renato Garcia Arruda

Vice-Diretor
Capitão de Mar e Guerra
Luís Felipe Silva Santos



CENTRO DE AUXÍLIOS À NAVEGAÇÃO ALMIRANTE MORAES REGO

Diretor
Capitão de Mar e Guerra
Fabio Santana Sobrinho

Vice-Diretor
Capitão de Fragata
Ramon Grosso de Almeida



BASE DE HIDROGRAFIA DA MARINHA EM NITERÓI

Comandante
Capitão de Mar e Guerra
Paulo Eduardo de Almeida

Imediato
Capitão de Fragata
Leandro dos Santos Novaes



CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA

Diretor
Capitão de Mar e Guerra
Paulo Roberto Costa Junior

Vice-Diretor
Capitão de Mar e Guerra
Pietro Piacentini Junior



CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

Comandante
Capitão de Mar e Guerra
Dante José de Andrade Alexandre

Imediato
Capitão de Mar e Guerra
Fábio Santana Sobrinho



GRUPAMENTOS DE NAVIOS HIDROCEANOGRÁFICOS

Comandante
Capitão de Mar e Guerra
João Candido Marques Dias

Imediato
Capitão de Fragata
Douglas Luiz da Silva Pereira



NAVIOS SUBORDINADOS AO GNHO

NAVIO POLAR "ALMIRANTE MAXIMIANO"

Comandante
Capitão de Mar e Guerra
Dieferson Ramos Pinheiro

Imediato
Capitão de Fragata
Felipe de Carvalho Garcez



NAVIO DE APOIO OCEANOGRÁFICO "ARY RONGEL"

Comandante
Capitão de Mar e Guerra
Fabiano de Medeiros Ichayo

Imediato
Capitão de Fragata
Márcio Morais de Lima



NAVIÓ OCEANOGRÁFICO "ANTARES"

Comandante
Capitão de Fragata
Eduardo Pereira Rezende

Imediato
Capitão de Corveta
Bernardo da Silva Oliveira Santos



NAVIÓ DE PESQUISA HIDROCEANOGRÁFICO "VITAL DE OLIVEIRA"

Comandante
Capitão de Fragata
Daniel Peixoto de Carvalho

Imediato
Capitão de Fragata
Edno Vieira da Rosa Neto



NAVIÓ HIDROCEANOGRÁFICO "CRUZEIRO DO SUL"

Comandante
Capitão de Fragata
Claudio Luiz Pereira Batista

Imediato
Capitão de Fragata
Fernando José Matias Nunes



NAVIÓ HIDROCEANOGRÁFICO FAROLEIRO "ALMIRANTE GRAÇA ARANHA"

Comandante
Capitão de Fragata
Renato da Fonseca Lacerda Batista

Imediato
Capitão de Corveta
Rafael Barbosa de Oliveira Torres



NAVIÓ HIDROCEANOGRÁFICO "AMORIM DO VALLE"

Comandante
Capitão de Corveta
Leonardo da Silva Vieira

Imediato
Capitão de Corveta
Pablo Araujo Barbosa



NAVIÓ HIDROCEANOGRÁFICO "TAURUS"

Comandante
Capitão de Corveta
André Popescu Braço

Imediato
Capitão-Tenente
Rafael da Silva Fernandes de Oliveira



AVISO DE PESQUISA "ASPIRANTE MOURA"

Comandante
Capitão-Tenente
Pedro Magon Olivio

Imediato
Capitão-Tenente
Raphael Teles de Carvalho



CENTROS DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO E NAVIOS SUBORDINADOS

CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO NORTE

Diretor
Capitão de Mar e Guerra
Andérmisson Claudino da Silva Moura

Vice-Diretor
Capitão de Corveta
Gustavo Mandarino Borges de Lima



NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO "GARNIER SAMPAIO"

Comandante
Capitão de Corveta
Jean Jaques Bergamaschi

Imediato
Capitão de Corveta
Pedro Paiva Barros de Abreu



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "RIO TOCANTINS"

Comandante
Capitão-Tenente
Almir Freire Pereira Lodi

Imediato
Capitão-Tenente
Thiago Oliveira Seabra dos Santos



NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR "TENENTE CASTELO"

Comandante
Capitão-Tenente
João Paulo Martins Camelo

Imediato
Capitão-Tenente
Alexandre Barros de Vasconcellos



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "RIO XINGU"

Comandante
Capitão-Tenente
Daniel Martins Saraiva Leontsinis

Imediato
Capitão-Tenente
Rafael Rio Ferreira



CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO NOROESTE

Diretor - COSTA SUL
Capitão de Fragata
Bruno Leonardo Rodrigues Alves

Vice-Diretor
Capitão de Corveta
Victor Alves Pereira



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "RIO NEGRO"

Comandante
Capitão-Tenente
Matheus Ronaldo Custodio Brandão

Imediato
Capitão-Tenente
Diego dos Santos Sarthour



NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "RIO BRANCO"

Comandante
Capitão de Corveta
Felipe Gabriel Sabroza José

Imediato
Capitão-Tenente
Herbert Venicius Melo Gomes



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "RIO SOLIMÕES"

Comandante
Capitão-Tenente
Anderson Alonso Lacerda Rangel

Imediato
Primeiro-Tenente
Gabriel Barbosa Amaral



CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO OESTE

Diretor
Capitão de Fragata
Gizo Sampaio Machado

Vice-Diretor
Capitão de Corveta
Julio Vitório dos Santos Ferreira



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL "CARAVELAS"

Comandante
Capitão-Tenente
Gabriel Pinto Roiffé

Imediato
Capitão-Tenente
Luan da Paixão Ribeiro Casimiro



SERVIÇOS DE SINALIZAÇÃO NAÚTICA E NAVIOS SUBORDINADOS

SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NAÚTICA DO NORDESTE

Encarregado de Serviço
Capitão de Corveta
Thiago dos Santos Ferreira

Ajudante de Serviço
Capitão-Tenente
Phelipe da Silva Ferreira Garcia



NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR "COMANDANTE MANHÃES"

Comandante
Capitão-Tenente
Leonardo Rabetim de Oliveira

Imediato
Primeiro-Tenente
Eduardo Cesar Trotta de Moraes



SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NAÚTICA DO LESTE

Encarregado
Capitão de Fragata
Ricardo Magalhães Valois

Ajudante
Capitão de Corveta
Leonardo Nogueira de Moraes



NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR "TENENTE BOANERGES"

Comandante
Capitão-Tenente
Lucas da Costa Medeiros

Imediato
Primeiro-Tenente
Filipe de Lima Teixeira



SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NAÚTICA DO SUL-SUDESTE

Encarregado
Capitão de Corveta
Nelson Ferraz de Araujo Neto

Ajudante
Capitão de Corveta
Luís Henrique Antunes de Oliveira



NAVIO BALIZADOR FAROLEIRO "MÁRIO SEIXAS"

Comandante
Capitão-Tenente
Rodrigo Fernando Teles Romeiro

Imediato
Capitão-Tenente
Patrick Venancio



SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NAÚTICA DO SUL

Encarregado
Capitão de Corveta
Felipe Augusto Affonso dos Santos

Ajudante
Capitão de Corveta
Vitor Decache Chiozzo



NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR "COMANDANTE VARELLA"

Comandante
Capitão-Tenente
João do Amaral Araujo

Imediato
Capitão-Tenente
Airton Luís Mesquita Ferreira





Batimento de Quilha

Incorporação à
Marinha do Brasil (MB)

Visita do Presidente
Juscelino Kubitschek

1956

1958

1958

1957

1958

1967

Lançamento ao mar

1º pouso de aeronave de asa rotativa em
um convés de voo, sendo o 1º navio da
MB a executar pouso a bordo

Participação na IX Convenção
Hidrográfica Internacional,
em Mônaco

FICHA TÉCNICA



Construção: Ishikawajima Heavy Industries, Tóquio, Japão

Deslocamento: 1.448 ton (padrão), 1.885 ton (carregado)

Dimensões: 77.90 m de comprimento, 12.03 m de boca e 3.70 m de calado

Propulsão: dois motores diesel de 10 cilindros em V, com potência de 1.550HP a 850rpm, acoplados a dois eixos com hélices de passo controlável de quatro pás com 2m de diâmetro e acionamento hidráulico

Velocidades: máxima de 14 nós, máxima mantida de 12 nós e de cruzeiro de 11 nós



Navio Hidrográfico "Sirius" *"Escola de Hidrografia"*

**64 ANOS DE SERVIÇOS PRESTADOS
À MARINHA DO BRASIL
1958 - 2022**



Levantamentos Hidrográficos na Namíbia,
gerando 1ª carta náutica feita pela DHN
para outro país, sobre as proximidades
do porto de Walvis Bay

Mostra de Desarmamento,
após 843.666 milhas náuticas
navegadas e 4.575 dias de mar

1995 1997

2022

1989

2016

1º Levantamento Hidrográfico na Barra Norte
do Rio Amazonas, com uso inédito na
MB de posicionamento por GPS

Condecoração com
Ordem do Mérito Naval

Equipamentos: dois ecobatímetros para Hidrografia, um ecobatímetro para Navegação, ecobatímetros portáteis, duas lanchas hidrográficas, um guincho oceanográfico e uma sondareza

Aeronaves: pouso de Esquilo UH-12/13 e Bell IH-6, VERTREP com helicópteros do porte de até UH-14 e PICK-UP com helicópteros do porte de SH-3

Código Internacional de Chamada: PWQO



DIA DO HIDRÓGRAFO

APOIO:



Abrigo do Marinheiro,
O mar de benefícios da Família Naval

AULA INAUGURAL PARA A 75ª TURMA DO CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS (CAHO)

"A OPÇÃO PELA HIDROGRAFIA, UMA GUINADA APAIXONANTE PARA O MAR."

Marco Antônio LINHARES Soares
Contra-Almirante

Bom dia a todos! Senhor Almirante Arruda, Diretor de Hidrografia e Navegação, a quem agradeço o gentil convite para proferir essa aula, que é uma honra para nós Hidrógrafos, uma efeméride que ocorre apenas uma vez, e que o senhor generosamente me concede.

Saúdo os demais presentes, ilustres professores e amigos, assim como os Oficiais-alunos do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e as Praças do Curso de Especialização em Hidrografia e Navegação. Calorosos cumprimentos aos Oficiais das Marinhas amigas de Camarões e da Bolívia.

Dispus sobre a mesa a palamenta inerente aos Hidrógrafos, pois assim requer nossa profissão (vários petrechos como aerosol limpa-contatos e antiferrugem, compasso, binóculos, lanterna, silver *tape*, publicações etc.). Intitulei essa aula: "A opção pela Hidrografia, uma guinada apaixonante para o mar". Memorizem o termo "paixão"; a Hidrografia tem que ser exercida com paixão, para toda vida. O Hidrógrafo é apaixonado pelo mar, estudará para sempre a dinâmica dos oceanos, o regime dos ventos, o fenômeno das marés. Fará interação com as cidades e portos litorâneos e fluviais, conhecerá as toponímias, e assim ad-

quirirá vasto conhecimento das ciências naturais e terá uma sólida cultura. Com o tempo, perceberá que sua veia poética é refinada, decorrente da observação dos fenômenos naturais que precisará descrever, em longas viagens, em Navios escoteiros, trabalhando com equipes reduzidas, mas muito unidas.

Assim, evocando o saudoso Almirante Ivan Pereira ARÊAS, que em 1995 proferiu sua aula inaugural à minha turma do CAHO percorrendo os versos do poeta Luís de Camões, enuncio o canto V estrofe 12 de "Os Lusíadas": "Sempre, enfim, pera o Austro a aguda proa", projetando o Navio de Apoio Oceanográfico Ary Rongel investindo a proa (não tão aguda) para o Sul em mar inclemente. Enalteço assim o Almirante Arêas, a veia poética do Hidrógrafo, sua vasta cultura e nossa apurada organização. Sabem como facilmente encontrei a aula do Almirante ARÊAS de 1995, inclusive citando a ilustre presença do VAlte (Hidrógrafo) Santos Franco na ocasião? Nos Anais Hidrográficos de 1996, está tudo lá rigorosamente registrado no arquivo técnico de nossa DHN.

Mas nem tudo são requintes poéticos e de estudos. Há também as histórias, e o Hidrógrafo é um contumaz contador de casos do mar, aprimorado pelos longos



períodos de viagens. Ouvi do Comandante (Hidrografo) Manoel Luís BUSNARDO, que no Comando do Navio Faroleiro “Almirante Graça Aranha”, recebeu a missão de estabelecer a Barca-Farol “Manoel Luís” sobre o parcel Manoel Luís, na costa do Maranhão. Valendo-se da inusitada coincidência do nome composto não tão comum, ele me contou como deu o pronto da faina para o CAMR, por mensagem: “o próprio lançou a própria sobre o próprio” (risos). Esse espírito de conciliar a dificuldade com um refinado senso de humor faz parte da Hidrografia.

Os *slides* projetados ilustram o início da minha carreira nos Navios da DHN, em fainas diversas, como 2º Ten no “Antares”, meu primeiro Navio, em Abrolhos, Fernando de Noronha, ilhas da Trindade e Martin Vaz, Arquipélago de São Pedro e São Paulo, no Farol de Castelhanos com seus 2 burricos, na Lagoa dos Patos, numa viagem pra Antártica no saudoso Navio Faroleiro Barão de Teffé, com o Zé Peixe, práctico do Rio Sergipe, com o Comandante Dante (atual Comandante do CIAARA) cheio de *goods* na viagem que fizemos para a Nigéria, e nos meus inesquecíveis Comandos do “Tenente Boanerges” e do “Amorim do Valle”. Na opção pela Hidrografia, os senhores viverão intensamente diversas atividades de campo em longínquas e remotas áreas, e terão muitas histórias pra contar, como bons Hidrógrafos, elaborarão consistentes termos de viagem, folhas de bordo, folhas topográficas e serão verdadeiros homens do mar.

Entretanto, o mais importante a enfatizar, é que, nessa Diretoria, nosso trabalho é simplesmente anônimo. Exce-

tuando-se o Barão de Teffé e o Vital de Oliveira, todos os demais trabalhos dos Hidrógrafos são anônimos. Assim se caracteriza nossa produção náutica: de excelência, porém silenciosa, os créditos são devidos unicamente à DHN, e nunca a um Hidrógrafo em particular.

Minha singradura na Marinha está solidamente traçada nessa Diretoria e em seus Navios brancos e encarnados. Até mesmo os cargos que exerci fora do CNPA foram afetos aos temas da Diretoria, seja no EMA, na Missão do Brasil junto à ONU, nos cursos da EGN e na SECIRM. Os dois anos no timão do GNHo foram plenos de imersão à causa hidrográfica, assim como na época em que servi na BHMN, fiz excelentes amizades e sobretudo, aprendi bastante, valorizando e respeitando os bravos profissionais e artífices daquela Base.

Nessa imagem, resplandece a Ilha Fiscal que foi sede da DHN de 1914 a 1983, permanecendo na ilha até 1996 a Superintendência de Navios, embrião do GNHo, e os Navios no píer. Ali funcionou a gráfica onde foram impressas as primeiras cartas náuticas, começando pela do Porto de Cananéia. Há pouco tempo dei uma entrevista na ilha Fiscal, e identifiquei no píer, em tinta amarela quase apagada, o registro “Privativo da DHN”, evocando a célebre resposta do então Diretor da DHN, Almirante Roxo Freitas, quando lhe perguntaram: “Onde está escrito que é privativo da DHN para se atracar aí?” E ele respondeu: “no cais”. Junto a essas boas recordações, sempre que marcarem o alinhamento Ilha Fiscal-Candelária, lembrem-se como sendo a sede histórica da DHN.



A DHN tem alguns símbolos e valores consagrados. Os senhores que estão ingressando, preservem com paixão e argumentos estes símbolos. Há alguns anos, nosso lema “Restará sempre muito o que fazer...” foi repentinamente alterado para “*Stella Nautis Ducens*”, como gravado neste porta-lápis do SSN-2. Até a canção do Hidrógrafo sofreu essa alteração. Agradeço aos chefes navais que retornaram à versão original.

O bode verde, viril e sempre aprovado para o Leste, onde ocorrem as lides hidrográficas, nos representa. Sua cor inspira-se nas capas verdes das publicações típicas da Diretoria. O sinete da DHN está estampado em todas as cartas náuticas e publicações, e o marco testemunho, amplamente estabelecido no litoral e margens de rios e nas ilhas oceânicas, onde se sobressai a *Epsilon* da constelação do Cruzeiro do Sul, referencia as precisas latitude e longitude determinadas pelos Hidrógrafos. A clássica tríade: “calculado, conferido e verificado”, um método de checagem em 3 etapas, com aposição dos nomes, é adotada em todos os cálculos e afazeres hidrográficos. Por último, cito o “Bodinho”, a lancha Procyon, a marca da DHN no cais da bandeira, que permanece fazendo o transporte diário à Ponta da Armação quando muitas similares desvaneceram.

Nosso patrono, Manoel Antonio Vital de Oliveira, tombou no Comando do Monitor Encouraçado Silvado no combate de Curupaiti, durante a guerra da Tríplice Aliança. Sondou e publicou a carta náutica do Atol das Rocas, realizada no late Paraibano, à vela e no prumo de mão. A carta é belíssima e disponível na inter-

net. Sua esposa editou, *post-mortem*, o roteiro desde a Foz do Rio São Francisco do Norte até Mossoró, outra obra de arte, onde um exemplar, ora projetado, está preservado no Navio de Pesquisa Hidroceanográfico Vital de Oliveira.

O idealizador e primeiro Diretor da Repartição Hidrográfica foi o Barão de Teffé, que participou da Batalha Naval do Riachuelo no Comando da Canhoneira Araguari. Sua fala está magistralmente eternizada em uma placa neste casario histórico, e serve de inspiração a todos os Hidrógrafos:

“Sou Hidrógrafo em tempos de paz, mas em tempo de guerra reivindico meus fôros de Oficial combatente e, por isso, me apresso em solicitar a V.Exa. permissão para conduzir o Navio sob meu Comando ao porto do Rio de Janeiro a fim de completar sua artilharia e munições bélicas e partir para o Rio da Prata e incorporar-me à divisão em operações.”

Em apertada síntese, cito a fase francesa, destacando o Almirante Mouchez, que nomeia avenida interna da DHN. O Almirante Mouchez (1821-1892) modernizou e sistematizou os trabalhos hidrográficos de nosso litoral, tendo sondado desde o Amazonas até o Cabo Santa Marta. O Almirante Tardy de Montravel (1811-1864) fez trabalhos de grande envergadura, sondando desde o Cabo Gurupi à Bahia de São Marcos, e também do Rio Pará ao Rio Amazonas.

Talentosos Hidrógrafos brasileiros edificaram os serviços de excelência da



Diretoria, dignificando a Marinha. Projeto, dentre muitos, o Almirante Maximiano, que conduziu o extenso LH da barra Norte do Rio Amazonas, no Comando do Navio Hidrográfico Rio Branco, de 1952 a 1953, o Almirante Santos Franco, precursor e desenvolvedor do método predictor de marés e Diretor da OHI e do IO-USP, o Almirante Leôncio, primeiro Comandante do Navio Aeródromo Ligeiro Minas Gerais e renomado escritor naval, o Almirante Ribas e o Comandante Bentes, ambos homenageados como nomes de montes submarinos. O Comandante Ferraz, que designa a EACF, foi pioneiro na concepção do PROANTAR e em 1975 defendeu sua tese de mestrado em marés na *Naval Postgraduate School* em Monterey (EUA). São vários profissionais do mar que anonimamente deram sua vida aos afazeres desta Diretoria, construindo um Serviço Hidrográfico de excelência, a quem somos gratos e comprometidos à perpetuá-lo e aprimorá-lo.

Os memoráveis Navio Hidrográfico Rio Branco e Navio Oceanográfico Almirante Saldanha, escola de Hidrografia e de oceanografia, respectivamente, muito fizeram pelo País, hidrografando a costa e desenvolvendo as ciências do mar, onde muitos Oceanógrafos puderam praticar suas lides oceânicas, imprescindíveis às suas formações e extensões.

Este helicóptero (imagem projetada na tela) fez o primeiro voo realizado pela Marinha, em janeiro de 1958 na baía de Tóquio, pelo então CT (AvN) Wigando Egelke, feito que levei ao atual Diretor da DAerM como uma primazia da DHN, pois o consagrado até então, seria

um voo em março de 1958, nas instalações aeronavais da Avenida Brasil. Ser Hidrógrafo é isso, uma eterna e vigilante admiração pelo trabalho da Diretoria. Inclusive, pouca gente sabe, mas a DHN tinha um avião Beech-BI, empregado em aerofotogrametria, quando a Marinha já não tinha mais aviões. A DHN sempre na vanguarda!

Quando me apresentei na Ponta da Armação em 1992, após a VIGM, o CD ainda não havia suplantado o disco de vinil, no entanto, nos postes dessas alamedas passavam-se cabos de fibra ótica. Fui gestor do Navio Oceanográfico Antares e recebi um *laptop* COMPAQ para rodar os programas da então Diretoria de Informática, de municiação, caixa de economias e pagamento, quando muitos dos meus companheiros de turma estavam na onça por uma máquina de escrever Olivetti. A DHN sempre colimou à frente.

Caros alunos, dividi a carreira na Hidrografia em 3 guinadas, sendo a primeira, o período embarcado nos Navios da DHN, o qual é basilar. Se os senhores viverem intensamente cada dia de mar “sondado”, “farolado” ou “oceanografado”, forem profundos conhecedores dos equipamentos, e dedicarem-se ao Navio e aos serviços da DHN, terão sólidos alicerces para uma carreira exitosa.

Esta fase abrange a navegação, meteorologia, oceanografia, Hidrografia, auxílios náuticos e respectivas publicações. Estas atividades devem ser exaustivamente conhecidas e praticadas, buscando-se sempre uma entrega, um resultado, um produto final, que vai desde



o restabelecimento de um farol, passando pela acertada previsão meteorológica até a folha de bordo. O balanço, o caturro e a perseverança do Hidrógrafo devem ser a rotina dessa primeira guinada da carreira após o curso.

Outro ponto imperioso: aprimorar-se na lancha de sondagem. Se vocês forem safos em lancha, serão bons também nos Navios. A voga de sondagem em lancha por vários dias, do nascer ao pôr do sol, exige preparo, tenacidade e habilidade. E nunca se esqueçam do WD40, do limpa-contatos, do *silver tape*, do canivete suíço, de uma boa lanterna, não servindo a de celular, sejam profissionais, não sejam o “velho da lancha”. A lancha de sondagem é específica, atua-se no leme ou telecomando intensamente, requer boa estabilidade, suporte para o transdutor, enfim, conheçam plenamente essa faina, evitem a todo o custo o excesso de feriados na sondagem ou “interrompi sondagem” por avaria ou inadequação da lancha. Vocês serão poucos e todos têm que guarnecer. Ao término da sondagem, iniciam-se os trabalhos de gabinete noite adentro para um novo dia de sondagem recomeçar, como na música adaptada: “ele só pensa em sondar, sondar, sondar, sondar”. Assim se refina o Hidrógrafo!

A segunda guinada é o embarque nas OM do CNPA, onde travarão contato com as responsabilidades internas e externas da Diretoria e suas repercussões, como o suporte técnico ao Plano de Levantamento da Plataforma Continental, as NORMAM da DHN, o BNDO, o Serviço Meteorológico Marinho, o Aviso aos Navegantes, as Cartas Náuticas estrangei-

ras, a seção de marés, o arquivo técnico, o conselho técnico, a oficina de serviços náuticos, a seção de agulhas magnéticas e meteorologia, a gráfica, dentre outros. Sobretudo, conhecerão as pessoas que fazem todas essas atividades funcionarem, e com eles aprenderão a grandeza da Hidrografia. Respeite-os! Uma vez, quando era Capitão de Corveta, fortuitamente encontrei o CMG (Ref^o) O'Dwyer nos arquivos do CHM-33, e ao saber que eu era secretário do conselho técnico, deu-me uma profunda explicação, uma verdadeira aula sobre o quadro de luzes e marcas (DHN-0615), editado conjuntamente pela DHN e DPC, da qual nunca me esqueci, e que erroneamente julgava um simples quadro a ser disponibilizado nos passadiços. Enfim, não somos coadjuvantes, somos copartícipes dos produtos e serviços da DHN.

A terceira guinada é passar a arrebentação do CNPA, quando estarão prontos para novos desafios em outras OM, descortinando temas da Marinha Mercante, portos, CNUDM, IMO, pesca, sim a DHN já editou cartas de pesca, ou ainda, enveredando-se para uma especialização técnica, o QTE. Em todas essas questões, o conhecimento adquirido no CNPA será intensamente demandado, e breve vocês dominarão com segurança temas tão diversos, sobressaindo-se perante seus pares.

É importante destacar que os senhores serão reconhecidos pela capacidade de descrever a dinâmica dos oceanos e o regime de ventos, razão pela qual sempre serão lembrados para encontrar objetos perdidos no mar, embarcações soçobradas, quedas de aeronaves, sinistros



de submarinos, deriva de embarcações, deriva de óleo no mar, etc. Então, neste curso, não se limitem às pesquisas de perigo, a MB espera de vocês uma capacidade diferenciada de conduzir buscas no mar.

Alguns temas em voga exigirão dos distintos Hidrógrafos, *experts* em oceanos, conhecimento para opinar com propriedade sobre: hipóxia dos oceanos, microplásticos, elevação do nível médio do mar, biotecnologia marinha, pesca IUU, mineração no mar e Antártica, por exemplo. Assim, estudem sempre, atualizem-se, não se limitem ao que aprenderão na semana topográfica ou no LHFC. Leiam as publicações especializadas, para que seus pareceres possuam a densidade que a MB necessitar.

Algumas peculiaridades da geografia nacional devem ser de seu pleno domínio, como a potencialidade da malha hidroviária fluvial, as ilhas oceânicas de Trindade e Martim Vaz, Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Arquipélago de São Pedro e São Paulo, seus limites marítimos e as pesquisas científicas que nelas são conduzidas, ou seja, todas as feições das 3.978 milhas náuticas do nosso litoral e sua projeção atlântica.

Importante realçar que recairá sobre os senhores a responsabilidade de bem assessorar sobre as especialidades de Praças HN, FR, GC, GR e ME, os itinerários de formação e de carreira, suas demandas e oportunidades, bem como valorizar esses profissionais. Vejam nesse *slide* que propus e levamos o CEMA, na VAP/2021, para conhecer 3 faróis guarnecidos, Santa Marta, Tramandaí e Chuí, seus respectivos faroleiros com suas famílias, o traba-

lho que realizam, e a presença da MB que eles representam naqueles rincões. Se vocês não o fizerem, quem bem o fará? Outro profissional do mar, que vocês conviverão nos Navios da DHN, é o Oceanoógrafo, e nós temos o dever de contribuir para sua formação, mostrar-lhe as boas perspectivas de carreira e sua importância para o país. Porto e mar são para profissionais experimentados nas lides oceânicas, nunca aventureiros.

Como Hidrógrafos, encarem os desafios, novas tecnologias vieram para ficar, como os ecobatímetros multifeixes, o posicionamento satelital diferencial submétrico e os sistemas de aquisição de sondagem. Novas tecnologias como aeronaves remotamente pilotadas, veículos autônomos de superfície e submarinos para sondagem e varredura sonar, o sistema de aerolevantamentos por laser, conhecido como “Lidar”, são novas ferramentas que continuamente surgem, dentre muitas outras, as quais os senhores terão o protagonismo de incorporá-las ou não ao nosso Serviço Hidrográfico, como ocorreu nos métodos de posicionamento anteriores, *raydist*, *microfix-motorola* e *navsat transit*. Nossa especialização convive naturalmente com essas evoluções, é intrínseco ao nosso serviço. O que não é superada é a tenacidade do Hidrógrafo, suas habilidades e conhecimento profundo das ciências do mar e da geociência.

Finalizando, cito que a atualização cartográfica será sempre requerida, os fundos oceânicos são esparsamente sondados, e a operação de um submarino nuclear por nossa Marinha exige conhecimento prévio da gravimetria, da magnetometria e



das sondagens da área de operações, não podemos expô-lo à indiscrição de vir a superfície para obter posições ou que um alto-fundo não esteja cartografado, como projetado nesse *slide*, mostrando os danos decorrentes da colisão do SSN “San Francisco” com uma elevação submarina a SE da ilha de Guam, em 2005. Ademais, ressalto que a criatividade do Hidrógrafo é um atributo genial, as tarefas de campo são muitas e os senhores terão que ter imaginação para resolvê-las. Faço a exibição deste filmete, de 2019, quando comandi o GNHo, em que o Comandante Reinert do Navio Oceanográfico Antares, aqui presente, passou ao Navio Hidrográfico Sirius, por drone, os extensos arquivos de maré de sua quinzena na barra Norte, em um *pen-drive*, um mini *vertrep*, pois as condições de mar não permitiam o emprego de embarcação miúda. Ou seja, a DHN está sempre à frente!

Finalizo projetando a carta náutica 1803 da baía de Guaratuba, uma área até então não cartografada, que empreendemos no meu LHFC de 1995. Fomos de Niterói para lá de ônibus, mais de 30 dias de trabalhos de campo ininterruptos, sondagem com o mestre Zico, profundo conhecedor do local, e por fim a carta ficou pronta. Portanto, dediquem-se ao CAHO, um sólido investimento profissional que a MB concede aos senhores.

Desejo-lhes que em breve estejam sob luzes de manobra restrita, encarnado-branco-encarnado, sondando, e que cresçam profissionalmente a cada Comissão, razão pela qual projeto a flâmula de fim de comissão, simbolizando períodos longos de afastamento que caracterizam as viagens da DHN.

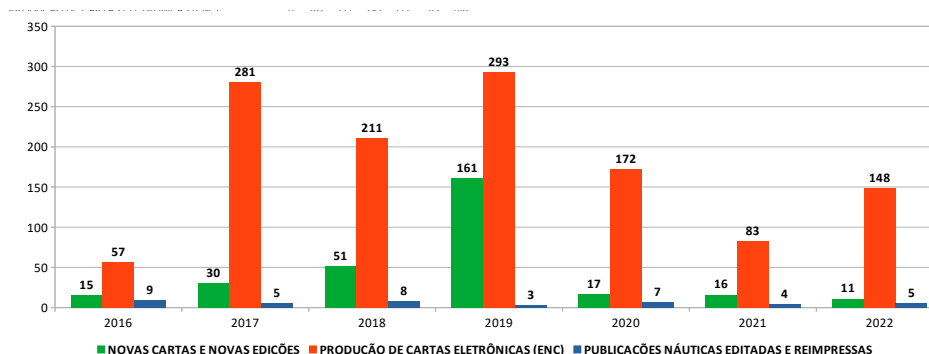
“Restará sempre muito o que fazer...”



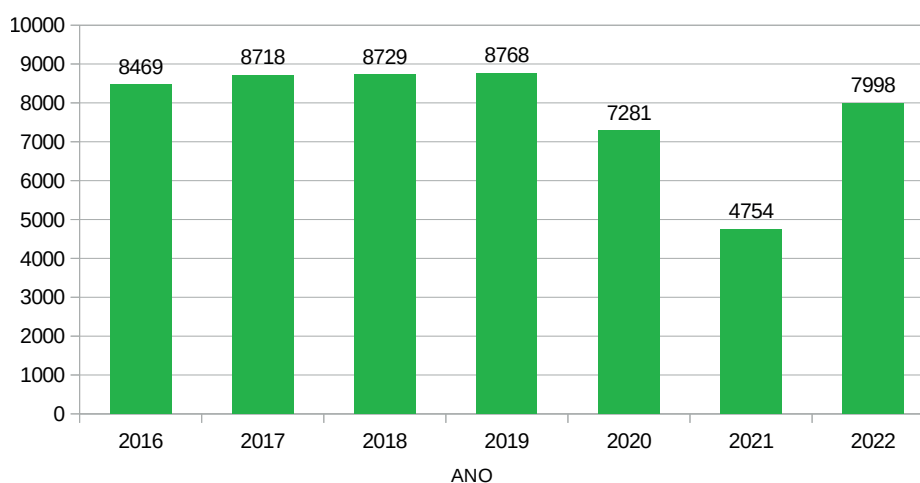
I – PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

1 – Apresentamos abaixo os dados referentes à produção cartográfica do Centro de Hidrográfico da Marinha (CHM) e outras publicações náuticas realizadas pela Base de Hidrografia da Marinha em Niterói (BHMN) incluindo o período de 2016 a 2022:

PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA



CARTAS IMPRESSAS POR DEMANDA



2 – A lista completa das cartas e outras publicações realizadas no ano de 2022 estão disponíveis através do QR Code abaixo:



II – PROGRAMA DE CONCLAVES E INTERCÂMBIOS

1 – CONCLAVES

1.1 – GOVERNAMENTAIS NO EXTERIOR

Reuniões da Comissão de Limites da Plataforma Continental. Nova Iorque, EUA.

Sessões da Comissão de Limites da Plataforma Continental. Nova Iorque, EUA.

1.2 – GOVERNAMENTAIS NO PAÍS

Não houve.

1.3 – NÃO GOVERNAMENTAIS NO PAÍS

Congresso Brasileiro de Meteorologia. Bauru, SP.

Workshop de Desafios Tecnológicos em Computação e Automação para o Ecossistema Costeiro e Oceânico. Rio Grande, RS.

1.4 – NÃO GOVERNAMENTAIS NO EXTERIOR

Reunião do Conselho da Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Principado de Mônaco.

Reunião da Comissão Hidrográfica da Mesoamérica e do Mar do Caribe (MACHC). Saint Louis, EUA.

Reunião da Comissão Hidrográfica do Atlântico Sudoeste (CHAtSO). Montevideu, Uruguai.



Sessão do Conselho Executivo da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI). Paris, França.

Reunião da Aliança Regional em Oceanografia para o Atlântico Sudoeste Superior e Tropical (OCEATLAN). Montevideú, Uruguai.

Reunião do Comitê da OHI de Coordenação Inter-Regional (IRCC). Bali, Indonésia.

Sessão do Conselho da *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA). Copenhague, Dinamarca.

Reunião do *International Board on Standards of Competence for Hydrographic Surveyors and Nautical Cartographers* (IBSC). Cadiz, Espanha.

Reunião Interseccional da *International Board on Standards of Competence for Hydrographic Surveyors and Nautical Cartographers* (IBSC). Cingapura.

Reunião e Conferência do *Advisory Board on the Law of the Sea* (ABLOS). Monte Carlo, Mônaco.

Sessão do Comitê de Orientação e Acompanhamento da 20ª Conferência Internacional da *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (5th IALA Conference Committee). Saint-Germain-en-Laye, França.

Reunião do *Internacional Centre for Electronic Navigational Charts* (IC-ENC) *Steering Committee*. Antuérpia, Bélgica.

Recapacitação dos Validadores do LA-RENC no *Internacional Centre for Electronic Navigational Charts* (IC-ENC). Taunton, Reino Unido.

Reunião do *Hydrographic Services and Standards Committee* (HSSC). Bali, Indonésia.

Reunião da Comissão Hidrográfica para a Antártica (HCA). Berlim, Alemanha.

Reunião do GEBCO *Sub-Committee on Undersea Feature Names* (SCUFN). Monte Carlo, Mônaco.

Reunião do Grupo de Trabalho da S-100 (S100WG). Principado de Mônaco.

Reunião do Grupo de Trabalho em Cartografia Náutica (NCWG). Principado de Mônaco.

Reunião do *Worldwide ENC Database Working Group* (WENDWG). Principado de Mônaco.

Reunião do Grupo de Trabalho em *Tidal, Current and Water Level* (TWCWG). Cidade do Cabo, África do Sul.

Sessão do *Data Buoy Cooperation Panel* (DBCP). Paris, França.



Reunião do Comitê de *Vessel Traffic Service* (VTS) da *International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities* (IALA – VTS). Saint-Germain-en-Laye, França.

Reunião do *ENC Working Group* e *S-101 Project Team Meeting* (ENC-S101). Wellington, Nova Zelândia.

MTS International Buoy Workshop. Wilmington, EUA.

Conferência de Hidrografia da Comunidade dos Países de Língua Portuguesa. Lisboa, Portugal.

Reunião do Grupo de Trabalho *International Ice Charting*. Buenos Aires, Argentina.

Workshop para Administração de Bases de Dados Hidrográficos. Guayaquil, Equador.

2 – INTERCÂMBIOS

Estágio no Serviço Hidrográfico da Armada do Equador. Guayaquil e Galápagos, Equador.



III – CURSOS E ESTÁGIOS EM INSTITUIÇÕES EXTRAMARINHA

1 – CURSOS

1.1 – PÓS-GRADUAÇÃO

Análise da Refletividade do Sinal Acústico pelo Fundo Marinho no Espectro das Comunicações Submarinas – Mestrado em Geologia e Geofísica, Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ.

Determinação e Validação de Modelos de Separação de Superfícies com Referência ao Elipsóide pelo GNSS E GNSS/INS – Mestrado em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR.

Extremos de onda causados por ciclones no Oceano Atlântico Sudoeste: distribuição de casos e balanço de calor e vorticidade dos sistemas geradores – Mestrado em Meteorologia, Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.

Investigação das esteiras turbulentas em um ambiente não uniformemente estratificado para detecção de submarinos – Mestrado em Meteorologia e Oceanografia (METOC). Monterey, EUA.

Abordagem de segmentação geográfica para batimetria derivada por satélite – Mestrado em *Earth Sciences “Ocean Mapping”*. Durhan, EUA.

Modelagem oceanográfica costeira com aplicação no estudo da mobilidade de objetos no fundo marinho – Doutorado em Oceanografia Física. Monterey, EUA.

1.2 – QUALIFICAÇÃO PROFISSIONAL

Meteorologia Aeronáutica. Escola de Especialistas de Aeronáutica. Força Aérea Brasileira. Guaratinguetá, SP.

Eletrônica Básica. Santos, SP.

Instalação de Sistemas Fotovoltaicos. Rio de Janeiro, RJ.

Instalação, Configuração e Uso do *Software* LDM/Gempak. Cachoeira Paulista, SP.

Meteorologia Operacional e Clima do Brasil. Brasília, DF.

Análise e Previsão do Tempo. Cachoeira Paulista, SP.

Calibração de Sensores Meteorológicos. Cachoeira Paulista, SP.

Ciência de Dados com *Python* (modalidade virtual)

2 – ESTÁGIOS

Assimilação de Dados – ICON/COSMO. Brasília, DF.

Implementação Operacional. Cachoeira Paulista, SP.

Verificação Climáticos Estatística e Modelagem Numérica. Cachoeira Paulista, SP.

IV – CURSOS REGULARES

RELAÇÃO DE FORMANDOS E PRÊMIOS DOS CURSOS DO SISTEMA DE ENSINO NAVAL, ANO 2022

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE HIDROGRAFIA PARA OFICIAIS (CAHO)

Oficiais que concluíram o 75º Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais – Turma 2022, em ordem de classificação



Oficiais Alunos do Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia de Oficiais

2ºTen	NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS
2ºTen	RODOLFO NOGUEIRA LEAL FABRICIO
2ºTen	RAFAEL MACHADO MOTA GARCIA
2ºTen	UBIRATAN FERREIRA SOUZA
2ºTen	ARTHUR WILSON FONSECA COELHO
2ºTen	BRUNO FRANCESCO FARINOLE DALL'ANTONIA
2ºTen	LUCAS BASSANI DA SILVA
1ºTen	AKAMBA MONICK SERGE (Marinha da República dos Camarões)
2ºTen	LEONARDO CARDOZO PEREIRA



1º Colocado: 2ºTen NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS, com média final 9,601.

PRÊMIOS ESCOLARES

PRÊMIO “EVOLUÇÃO E APLICAÇÃO”

Concedido pela Diretoria de Ensino da Marinha ao Oficial-Aluno classificado em primeiro lugar no seu curso.

2ºTen	NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS
-------	------------------------------

MEDALHA-PRÊMIO “COMANDANTE VITAL DE OLIVEIRA”

A Medalha-Prêmio Comandante Vital de Oliveira, concedida pela DHN, foi criada em homenagem ao Capitão de Fragata Manoel Antônio Vital de Oliveira, Patrono da Hidrografia da Marinha, e destina-se a agraciar o Oficial que concluir o Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais em primeiro lugar.

2ºTen	NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS	9,601
-------	------------------------------	-------

CERTIFICADO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM DISTINÇÃO

Concedido pelo Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino aos militares que obtiverem média final igual ou superior a nove e meio (9,500) em seus respectivos cursos:

2ºTen	NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS	9,601
2ºTen	RODOLFO NOGUEIRA LEAL FABRICIO	9,565
2ºTen	RAFAEL MACHADO MOTA GARCIA	9,561
2ºTen	UBIRATAN FERREIRA SOUZA	9,551



CERTIFICADOS DE DESEMPENHO ESCOLAR, CONCEDIDOS PELO CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

LÁUREA “VITAL DE OLIVEIRA”

Destina-se a premiar o Oficial do Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais que obtiver a maior média na área de Hidrografia, abrangendo as disciplinas de Geodésia, Topografia, Cartografia, Gerenciamento de Dados Hidrográficos, Hidrografia e Levantamento Hidroceanoográfico de Fim de Curso, desde que em nenhuma delas o aluno tenha obtido média inferior a oito (8,000).

2ºTen	NATAN DOS SANTOS MASCARENHAS
-------	------------------------------

LÁUREA “ALMIRANTE PAULO MOREIRA”

Destina-se a premiar o Oficial do Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais que obtiver a maior média na área de Geofísica, abrangendo as disciplinas de Oceanografia, Meteorologia, Geologia e Geofísica Marinha, Marés e Sensoriamento Remoto, Aerofotogrametria e LiDAR, desde que em nenhuma delas o aluno tenha obtido média inferior a oito (8,000).

2ºTen	UBIRATAN FERREIRA SOUZA
-------	-------------------------

LÁUREA “ALMIRANTE MORAES REGO”

Destina-se a premiar o Oficial do Curso de Aperfeiçoamento de Hidrografia para Oficiais que obtiver a maior média na área de Auxílios à Navegação e Navegação, abrangendo as disciplinas de Auxílios à Navegação e Navegação - Sistemas e Normas, desde que em nenhuma delas o aluno tenha obtido média inferior a oito (8,000).

2ºTen	RODOLFO NOGUEIRA LEAL FABRICIO
-------	--------------------------------

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO EM HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (C-Ap-HN)

Militares que concluíram o 50º Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação – Turma 2022



Praças concluintes do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação

3ºSG-HN	DENIS ANTONIO DO VALE LEOPOLDINO
3ºSG-HN	RODRIGO JOSÉ FELIX CAVALCANTI DE ALMEIDA
3ºSG-HN	JOÃO EDIVANI DA ROCHA
3ºSG-HN	IGOR AUGUSTO MORAES DA SILVA
3ºSG-HN	LEONARDO ALMEIDA COSTA
3ºSG-HN	LUIS CARLOS ALMEIDA MARINHO
3ºSG-HN	VICTOR VINNÍCIUS MORAES DE SOUSA
3ºSG-HN	CRISTHIAN DA SILVA CORDEIRO
3ºSG-HN	FELIPE JOSÉ FAGUNDES SILVA
3ºSG-HN	NIKOLAS BARBOSA NORONHA GOMES
3ºSG-HN	FELIPE CLARO DE PAULA
3ºSG-HN	KEVIN WELLINGTON GOMES DE OLIVEIRA
3ºSG-HN	JEFFERSON GOMES DA SILVA
3ºSG-HN	VINICIUS SANCHES SOARES
3ºSG-HN	GUSTAVO LANZONI ALBERTINI FERREIRA
3ºSG-HN	DANILO TRINDADE PEGADO MENDES



3ºSG-HN	PEDRO AUGUSTO DE BARROS NETO
3ºSG-HN	CLEIDSON MELLO RIBEIRO
3ºSG-HN	LUIS MARCELO SARAIVA JUNIOR
3ºSG-HN	JOSÉ FERNANDES DA SILVA JÚNIOR
3ºSG-HN	ANDRE LUCAS DOS SANTOS VIDAL
3ºSG-HN	ÍTALO DA COSTA VASCONCELOS
3ºSG-HN	ALAN SOARES PESSANHA
3ºSG-HN	SÉRGIO PEREIRA VASCONCELOS
3ºSG-HN	JEFFERSON DOS ANJOS PEREIRA TEIXEIRA
3ºSG-HN	VICTOR COSTA PACHECO
3ºSG-HN	LUIZ FERNANDO GIRÃO CAMPITI JUNIOR
3ºSG-HN	HENRIQUE BARROSO AZEVEDO
3ºSG-HN	YVERTON GUTEMBERG DE LIRA SILVA
3ºSG-HN	FELIPE DOS SANTOS ANSELMO

1º Colocado: 3ºSG-HN DENIS ANTONIO DO VALE LEOPOLDINO, com média final 9,390.

PRÊMIOS ESCOLARES

PRÊMIO “ESTUDO E APLICAÇÃO”

Concedido pela Diretoria de Ensino da Marinha ao aluno classificado em primeiro lugar no seu curso.

3ºSG-HN	DENIS ANTONIO DO VALE LEOPOLDINO	9,390
---------	----------------------------------	-------

CERTIFICADOS DE DESEMPENHO ESCOLAR, CONCEDIDOS PELO CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

LÁUREA “BARÃO DE TEFFÉ”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação (C-Ap-HN) que obtiver a maior média na área de Hidrografia, abrangendo as disciplinas de Cartografia, Topografia, Geodésia, Marés, Hidrografia e Levantamento Hidrográfico de Fim de Curso, desde que em nenhuma delas o aluno tenha obtido média inferior a oito (8,000).

3ºSG-HN	JOÃO EDIVANI DA ROCHA
---------	-----------------------

LÁUREA “COMANDANTE FERRAZ”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação (C-Ap-HN) que obtiver a maior média na área de Meteorologia e Navegação, e abrange as disciplinas de Meteorologia e Oceanografia, desde que em nenhuma delas tenha obtido média inferior a oito (8,000).

3ºSG-HN	RODRIGO JOSÉ FELIX CAVALCANTI DE ALMEIDA
---------	--

LÁUREA “RADLER DE AQUINO”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação (C-Ap-HN) que obtiver a maior média na área de Navegação, e abrange as disciplinas de Navegação, Navegação Astronômica e Hidrografia e Navegação – Aspectos Legais, desde que não tenha obtido média inferior a oito (8,000):

3ºSG-HN	DENIS ANTONIO DO VALE LEOPOLDINO
---------	----------------------------------

CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE FAROLEIRO (C-Ap-FR)

Militares que concluíram o 36º Curso de Aperfeiçoamento de Faroleiro – Turma 2022



Praças concluintes do Curso de Aperfeiçoamento de Faroleiro



3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO
3ºSG-FR	DANIEL DO CARMO MELO
3ºSG-FR	WENDEL NUNES DOS SANTOS
3ºSG-FR	MAURICIO SIMÕES PEREIRA
3ºSG-FR	THALYS PORTO DOS SANTOS DOMINGOS
3ºSG-FR	GUSTAVO VINÍCIUS CAVALCANTE DE FARIAS
3ºSG-FR	NONATO JÚNIOR MONTEIRO DA SILVA
3ºSG-FR	ANDREI DE SÁ MOTA
3ºSG-FR	ISMAEL FERREIRA COUTINHO
3ºSG-FR	FLÁVIO DA MOTTA MACHADO
3ºSG-FR	JOÃO PAULO BARBOSA DA SILVA
3ºSG-FR	ALBERT LUÃ VERAS SILVA
3ºSG-FR	FELIPE COSTA BARRETO
3ºSG-FR	CHARLES DE SOUSA OLIVEIRA
3ºSG-FR	ALDO FONSECA SILVA
3ºSG-FR	JHAYMERSON HARLEY BAIA LEITE
3ºSG-FR	JOSÉ CARLOS PEREIRA NUNES JÚNIOR
3ºSG-FR	NILSON DOS SANTOS LEFUNDES
3ºSG-FR	WALLACE FERREIRA RODRIGUES

1º Colocado: 3ºSG-FR FELLIPE DIAS MACHADO, com média final 9,696.

PRÊMIOS ESCOLARES

PRÊMIO “ESTUDO E APLICAÇÃO”

Concedido pela Diretoria de Ensino da Marinha ao aluno classificado em primeiro lugar no seu curso.

3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO	9,696
---------	----------------------	-------

PRÊMIO “ALMIRANTE SALDANHA DA GAMA”

Concedido pela Diretoria de Ensino da Marinha, destina-se a premiar o Sargento que obtiver o primeiro lugar no seu curso, com média final igual ou superior a nove (9,000) entre todas as disciplinas constantes do currículo.

3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO	9,696
---------	----------------------	-------



CERTIFICADO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM DISTINÇÃO

Concedido pelo Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino aos militares que obtiverem média final igual ou superior a nove e meio (9,500) em seus respectivos cursos:

3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO	9,696
3ºSG-FR	DANIEL DO CARMO MELO	9,553

CERTIFICADOS DE DESEMPENHO ESCOLAR, CONCEDIDOS PELO CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO

LÁUREA “ALMIRANTE MORAES REGO”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento de Faroleiro (C-Ap-FR) que obtiver a maior média na área de Auxílios à Navegação, e abrange as disciplinas de Equipamentos de Auxílio à Navegação, Equipamentos e Sistemas Eletrônicos de Auxílios à Navegação e Projetos de Auxílios à Navegação, desde que em nenhuma delas tenha obtido média inferior a oito (8,000):

3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO
---------	----------------------

LÁUREA “FAROLEIRO ARÊAS”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento de Faroleiro (C-Ap-FR) que obtiver a maior média na área de Navegação, e abrange a disciplina de Navegação, desde que nela não tenha obtido média inferior a oito (8,000):

3ºSG-FR	FELLIPE DIAS MACHADO
---------	----------------------

LÁUREA “FAROLEIRO NASCIMENTO”

Destina-se a premiar o aluno do Curso de Aperfeiçoamento de Faroleiro (C-Ap-FR) que obtiver a maior média na área de Auxílios à Navegação, e abrange as disciplinas de Auxílios à Navegação, Operações e Administração de Auxílios à Navegação e Prática de Fim de Curso em Manutenção de Auxílios à Navegação, desde que em nenhuma delas tenha obtido média inferior a oito (8,000):

3ºSG-FR	DANIEL DO CARMO MELO
---------	----------------------

V – COMISSÕES

GRUPAMENTO DE NAVIOS HIDROCEANOGRÁFICOS

NAVIO POLAR “ALMIRANTE MAXIMIANO”



Figura 1 – Navio Polar “Almirante Maximiano” na Enseada Martel

O Navio Polar “Almirante Maximiano” participou das OPERANTAR XL e XLI, nas 2ª e 1ª Etapa das Comissões, respectivamente. Além de prestar apoio logístico à Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), realizou pesquisas científicas nas mais variadas áreas de conhecimento. Nesse sentido, destaca-se sua atuação na investigação de processos físico-químicos relevantes, que possibilitaram ampliar a compreensão do impacto das mudanças

ambientais no ecossistema do Oceano Austral e suas possíveis conexões com a zona costeira do Brasil.

No campo da meteorologia, o Navio contribuiu na coleta de dados atmosféricos e oceanográficos por diversos meios, tais como torre meteorológica instalada na proa, radiossondas, boias de deriva lançadas durante as travessias do Estreito de Drake e boias meteoceanográficas fundeadas no Oceano Austral (Figura 2).



Figura 2 – Fundeio de boia meteoceanográfica nas proximidades da Península Potter

Na área da oceanografia, destaca-se a realização de amostragens de água, material particulado em suspensão, material biológico, microplástico, material particulado atmosférico, bem como perfilagens com CTD/XBT, na região de confluência das Correntes do Brasil (CB)

e das Malvinas (CM) (Figura 3). A posição das estações oceanográficas foram determinadas ao longo da derrota, tendo em vista a avaliação sinótica, temperatura da superfície do mar (TSM) e das anomalias de altura dinâmica do nível do mar (AANM).



Figura 3 – Lançamento de Rossete na Confluência Brasil-Malvinas



No tocante à geologia, o Navio realizou perfilagem do subfundo marinho com o *Sub Bottom Profiler* (SBP), além

de diversas coletas de amostras geológicas com o *Box Core*, *Piston Core* (Figura 4) e *Gravity Core*.



Figura 4 – Coleta geológica com o *Piston Core* no Estreito de Bransfield

NAVIO DE APOIO OCEANOGRÁFICO “ARY RONGEL”



Figura 1 – Navio nas proximidades da Ilha Deception

No período de 12 de janeiro a 12 de abril de 2022, o Navio de Apoio Oceanográfico “Ary Rongel” realizou a 2ª etapa da Operação Antártica (OPERANTAR) XL. Durante esse período, o Navio prestou apoio logístico à Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), tendo realizado a transferência de carga, gêneros e óleo diesel antártico (ODA), além da realização de Levantamento Hidrográfico (LH), correspondente a uma área total sondada de 1.095 km², no Estreito de Bransfield, a cerca de 35 milhas náuticas ao sul da EACF.

Após intenso período de preparação do Navio, no início da OPERANTAR

XLI, em 9 de outubro de 2022, ocorreu o embarque de pesquisadores e alpinistas do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), além dos militares do Grupo-Base “Orca”, que foram designados para guarnecer a EACF no período de 2022/2023. Nessa mesma data, o Navio desatracou e iniciou a 29ª comissão austral consecutiva.

No transcurso da 1ª etapa da OPERANTAR XLI, o Navio prestou apoio logístico à EACF e a diversos projetos de pesquisa do PROANTAR nas Ilhas Deception, Pinguim e Rei George, no qual foi realizado o lançamento de duas boias meteorológicas.



Ainda na 1ª etapa da OPERANTAR XLI, em cumprimento ao Plano de Coleta de Dados de Meteorologia e Oceanografia da Diretoria de Hidrografia e Navegação (PCD-METOC DHN), foi realizada a coleta de dados oceanográficos com o termosalinógrafo e de dados meteorológicos com a Estação Meteorológica Automática, além da elaboração de mais de 360 mensagens SHIP, contribuindo para o incremento do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), com dados da costa sul da América do Sul e da Antártica.

Foi realizado Levantamento Hidrográfico ao sul das Ilhas Shetland do Sul, no Estreito de Bransfield, para produção das cartas náuticas 9151 e 9152, no qual foi sondada uma área de 422,3 km². Esse LH, em cumprimento ao Plano de Trabalho de Hidrografia da DHN (PTHidro DHN), é uma ação decorrente do compromisso assumido pelo Brasil, como membro da Comissão Hidrográfica na Antártica (*Hydrographic Commission on Antarctica* – HCA), junto à Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Tal compromisso prevê produção e atualização de cartas náuticas em cooperação com serviços hidrográficos de outros países, de forma a contribuir para a segurança da navegação, em áreas de interesse na Antártica.

Durante a execução das Operações Antártica (OPERANTAR) XL e XLI, destacaram-se, dentre as atividades realizadas

ao longo de 2022, o lançamento e o recolhimento de dois acampamentos de pesquisa científica na Antártica, na Ilha Rei George e na Ilha James Ross, marcando o retorno das atividades científicas em terra, de longa duração e em localidade distante da EACF, em atendimento ao Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR).

Além disso, em cumprimento ao Plano de Trabalho de Hidrografia da Diretoria de Hidrografia e Navegação (PTHidro DHN), foi realizada a execução de dois Levantamentos Hidrográficos (LH) no Estreito de Bransfield, correspondente a uma área sondada de 1.517,3 km², os quais contribuíram para gerar elementos para a produção das cartas náuticas 9151 e 9152 na Antártica. Por fim, ressalta-se o lançamento de duas boias meteoceanográficas nas proximidades da Ilha Pinguim e da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF), em apoio aos projetos ATMOS e CEOAC, ambos sob coordenação do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).



Figura 2 – Navio realizando atividades logísticas com a EACF



Figura 3 – Lançamento de boia meteoceanográfica na Enseada Mackellar



Figura 4 – Acampamento científico instalado na Ilha James Ross



NAVIO OCEANOGRÁFICO “ANTARES”



Figura 1 – Navio Oceanográfico “Antares”

O Navio Oceanográfico “Antares” realizou, entre os dias 16 de maio e 4 de julho de 2022, a Comissão PIRATA BR-XXII, em apoio ao Projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA), que trata-se de uma iniciativa entre instituições científicas do Brasil, Estados Unidos e França. A referida Comissão contou com a participação de pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e teve como objetivo precípua a manutenção das oito

boias sob responsabilidade do Brasil, destinadas à coleta de dados meteoceanográficos para o monitoramento do clima no Atlântico Tropical.

O Navio operou de forma confiável e cumpriu plenamente a desafiadora Comissão PIRATA, caracterizada por complexas fainas marinheiras e pela área geográfica, que se estende até o limite do entorno estratégico marítimo brasileiro, com pernadas de até 17 dias de mar e afastamento de mais de 1.000 milhas náuticas da costa.



Figura 2 – Militares realizando lançamento de boia



Figura 3 – Navio Oceanográfico “Antares”

No período de 7 de julho a 10 de agosto de 2022, o Navio Oceanográfico “Antares” realizou Levantamento Hidroceanográfico nas proximidades do Porto de Maceió-AL, abrangendo uma área de 116 km² em atendimento ao Plano Cartográfico Náutico Brasileiro III (PCNB

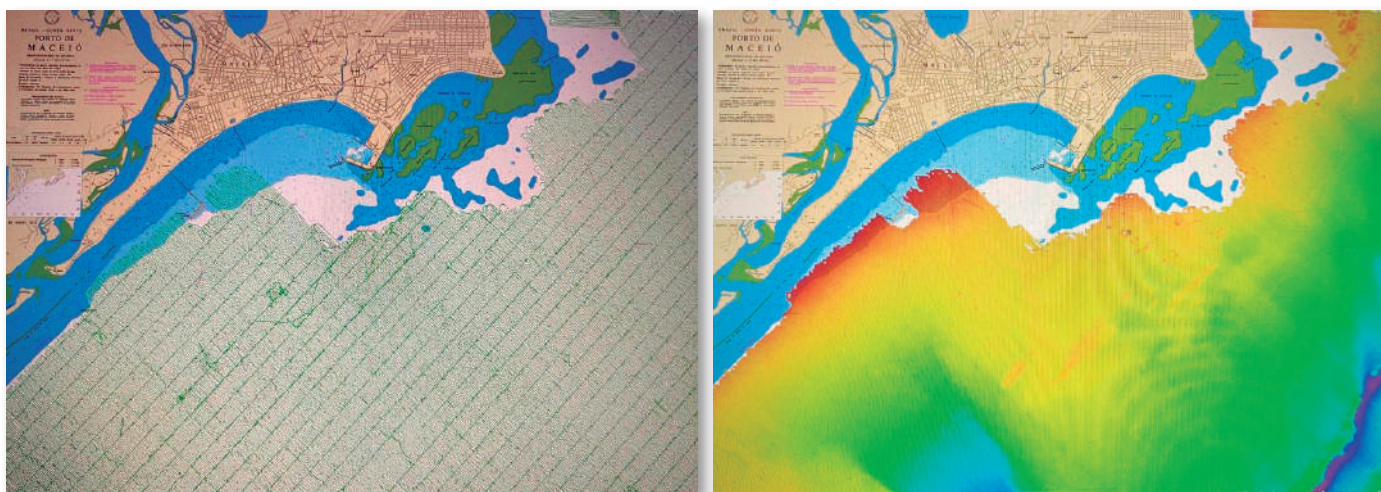
III). Os dados coletados serão utilizados como subsídios para a elaboração da Carta Náutica – 921 (CN-921), em substituição à atual CN-901, com o fito de contribuir para a garantia da segurança da navegação e salvaguarda da vida humana no mar.



Figura 4 – Militares realizando nivelamento geométrico



Figura 5 – Militares processando os dados obtidos



Figuras 6 e 7 – Sondagem batimétrica nas proximidades do Porto de Macaé-AL

Somando-se a isso, o Navio Oceanográfico “Antares”, durante o período de 13 a 16 de setembro de 2022, realizou a Comissão APOINST III nas proximidades da Baía de Guanabara. Nesse período, foram realizadas atividades referentes às disciplinas de Oceanografia e de Agulhas Náuticas, de modo a contribuir com a formação dos Oficiais hidrógrafos, proporcionando aos Oficiais-Alunos do Curso

de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais (CAHO) 2022 o conhecimento dos métodos e a prática das tarefas de aquisição e processamento de dados executados em uma comissão oceanográfica, além da realização de estações oceanográficas com o conjunto “CTD-Rosette” e coleta de dados com o perfilador de correntes por efeito *Doppler* (ADCP) e termosalinógrafo.



Figura 8 – Alunos do CAHO recebendo instrução

Entre os dias 22 e 27 de setembro de 2022, o Navio realizou a Comissão Paisagem Acústica II nas proximidades da Baía da Ilha Grande, no sul do estado do Rio de Janeiro. A Comissão foi realizada em proveito do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) e teve como objetivo realizar testes iniciais dos modelos acústicos da propagação costeira utilizados pelo Sistema de Previsão do Ambiente Acústico para o Planejamento das Operações Navais (SISPRES), concomitantemente com a aquisição de dados oceanográficos físicos, químicos, acústicos e biológicos.

As atividades de Oceanografia Física e Acústica Submarina dão suporte ao cumprimento das metas a serem realizadas pelo projeto SISPRES e também pelo projeto Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA). As atividades de Oceanografia Biológica atendem como extensão às atividades do mesmo projeto SISPRES no que diz respeito à perda acústica (TL) por atenu-

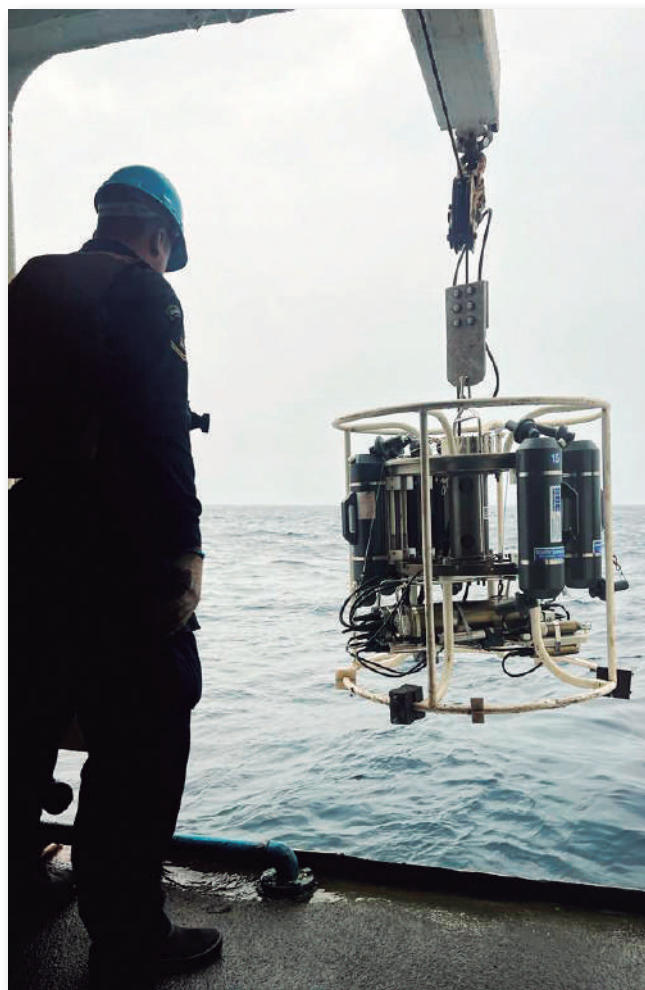


Figura 9 – Lançamento do conjunto CTD-Rosette

ação biológica. Vale destacar que os dados coletados na Comissão contribuíram para o enriquecimento da base de dados do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO).

Além disso, o Navio conduziu a realização de estações oceanográficas, observações batitermográficas (XBT) e lançamento de redes verticais de fitoplâncton, incluindo-se o lançamento de fundeio com ADCP e hidrofones autônomos.



Figura 10 – Militares realizando lançamento de fundeio com ADCP e hidrofones autônomos

Outro importante feito do Navio Oceanográfico “Antares”, durante o período de 16 de novembro a 9 de dezembro de 2022, foi a realização da Comissão Expedição IX (E)/Costa SE (Primavera) na área marítima entre os estados de São Paulo e Espírito Santo. A Comissão contemplou o Plano de Coleta de Dados da DHN, que prevê a obtenção de dados físico-químicos da água do mar destinado a produção de informações ambientais, necessárias ao planejamento e condução de operações navais nas áreas de interesse da Marinha, além do apoio ao Programa Nacional de Boias (PNBOIA) e ao Projeto REMO Observacional (REMObs), ambos coordenados pelo CHM, para o lançamento de três boias meteorológicas, sendo uma nas proximidades de Cabo Frio-RJ e duas na Baía de Santos, a cerca de 180 milhas náuticas da costa.



Figura 11 – Boia meteoceanográfica lançada pelo NOc “Antares”

NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO FAROLEIRO “ALMIRANTE GRAÇA ARANHA”



Figura 1 – NHoF “Alte Graça Aranha” fundeado nas proximidades da Ilha da Trindade durante a comissão PROTRINDADE II

O Navio iniciou suas atividades hidroceanográficas do ano de 2022, em 13 de março, com a Comissão de apoio ao Programa de Pesquisas Científicas na Ilha da Trindade, a PROTRINDADE II, finalizada em 6 de abril, do mesmo ano. A Comissão contou com a participação de especialistas de diferentes instituições de ensino e pesquisa do país (UERJ, FURG e UFRJ), no qual são desenvolvidos projetos em áreas como oceanografia, topografia, biologia, geologia e geodésia.

Neste período, foi realizado acampamento inédito na Ilha de Martin Vaz, com o pernoite de militares e pesquisadores por cinco dias. Dentre as atividades realizadas, destaca-se o rastreamento

estático por militares do Navio no marco geodésico já existente na ilha, a fim de incluí-lo na Rede do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Em abril, o Navio realizou comissão de Apoio a Instrução (APOINST I), conduzindo a prática de Compensação da Agulha Magnética para os dezoito alunos do Curso Expedito de Compensação de Agulhas Magnéticas (C-Exp-Ag-Mag), do Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA). Tal prática a bordo possibilitou aos militares lotados no Navio relembrar conceitos relativos à Compensação da Agulha Magnética de bordo.



Em maio, o Navio empreendeu a Comissão “SINALIZAÇÃO NÁUTICA SUDESTE III”, no litoral norte do Estado do Rio de Janeiro, realizando o abastecimento de combustível no Farol de Macaé, além de realizar inspeção e manutenção de sinais náuticos na área, dentre eles o Farolete Ilha Branca, Farolete Papagaios e Farolete Ilha dos Franceses, além do rodízio de boia de perigo isolado da Laje do Caboclo Alagado e da boia luminosa Pedra do Hermes.

Entre os dias 18 de agosto e 15 de setembro, o Navio representou o Brasil nos eventos anuais da Comissão Hidrográfica do Atlântico Sudoeste (CHAtSO) e da Aliança Regional para a Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical (OCEATLAN). O Navio permaneceu atracado no Porto de Montevidéu, Uruguai, entre os dias 29 de agosto a 4 de setembro, tendo a oportunidade de ser representado por três oficiais hidrógrafos na XVI Reunião da CHAtSO, realizada no *Palladium Business Hotel*, nos dias 30 e 31 de agosto, que contou com a

participação de representantes das Marinhas da Argentina, Bolívia, Espanha, Paraguai e Uruguai. A reunião abordou a coordenação das atividades hidrográficas e a produção cartográfica dos países-membros, bem como a cooperação e a capacitação técnica nas atividades relacionadas à hidrografia, cartografia e informações de segurança marítima. Já a XVIII Reunião da OCEATLAN aconteceu nos dias 1º e 2 de setembro, quando foram apresentados os trabalhos das comitativas participantes, revisadas as recomendações da última reunião e discutidas as perspectivas para a Aliança Regional.

Encerrando as atividades hidroceanográficas do ano de 2022, o Navio realizou no mês de novembro, o transporte de 11 pesquisadores para a Ilha da Trindade, durante a comissão PRO-TRINDADE VI, contribuindo para os projetos Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração das Ilhas Oceânicas (PELD ILOC) e Petrogênese da Cadeia Vitória-Trindade.



Figura 2 – Oficiais do NHoF “Alte Graça Aranha” realizando Rastreio Estático em Martin Vaz



Figura 3 – Navio realizando rodízio de boias durante a comissão Sinalização Náutica Sudeste III



Figura 4 – Diretor de Hidrografia e Navegação, Vice-Almirante Renato Garcia Arruda, o Embaixador do Brasil no Uruguai, Sr. Marcos Leal Raposo Lopes e o Comandante do Navio, Capitão de Fragata Marcelo de Abreu Souza



NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO “CRUZEIRO DO SUL”



Figura 1 – Foto do NHo “Cruzeiro do Sul”

O NHo “Cruzeiro do Sul” realizou, entre os dias 5 e 17 de fevereiro de 2022, a Comissão Expedição IV/CSUB-XI-2022 / Apoio ao INPE, na região ao sul da Baía de Campos. A Comissão teve como escopo realizar a manutenção e o lançamento das boias meteoceanográficas do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) e do Programa “Rede de Modelagem e

Observação Oceanográfica – Observacional (REMO)”, bem como realizar o recolhimento de uma boia meteoceanográfica do projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) e testes com os sistemas de transmissão e recepção do projeto de comunicações (C-SUB), em área de ocorrência de ressurgência sobre a plataforma continental.



Figura 2 – Dispositivo de lançamento da boia meteorológica

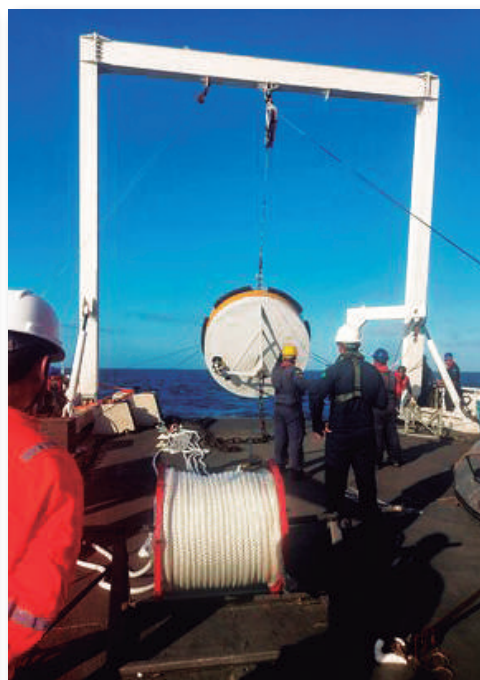


Figura 3 – Lançamento da boia meteorológica BMO-BR na região ao sul da Baía de Campos

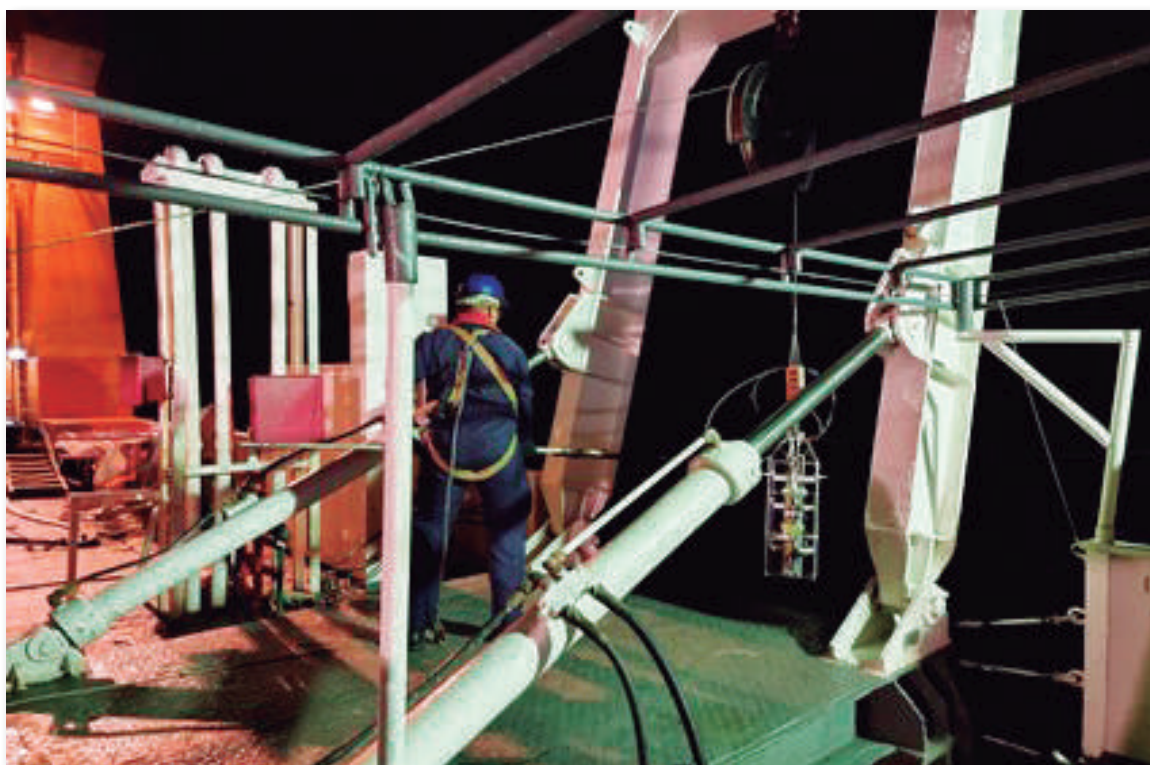


Figura 4 – Realização de testes com equipamentos do projeto de comunicações (C-SUB) em apoio ao IEAPM, próximo ao litoral de Arraial do Cabo-RJ



Figuras 5 e 6 – Recolhimento da boia do Projeto PIRATA, ao sul da Baía de Campos

Entre os dias 15 de março a 8 de abril de 2022, o NHo “Cruzeiro do Sul” realizou a Comissão LEPLAC ERG na área marítima compreendida entre os estados do Paraná e do Rio Grande do Sul. Nessa Comissão, o Navio realizou a coleta de dados de batimetria e de subfundo, a fim de contribuir para a determinação da isóbata de 2500 metros e, posteriormente,

da linha de 100 milhas a partir da isóbata de 2500 metros, em apoio ao Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC). Além disso, foi efetuado o lançamento de uma boia meteorceanográfica do tipo *Spotter V2*, em apoio ao Projeto REMO Observacional, ao sul do Arquipélago de Alcatrazes, no litoral do estado de São Paulo.

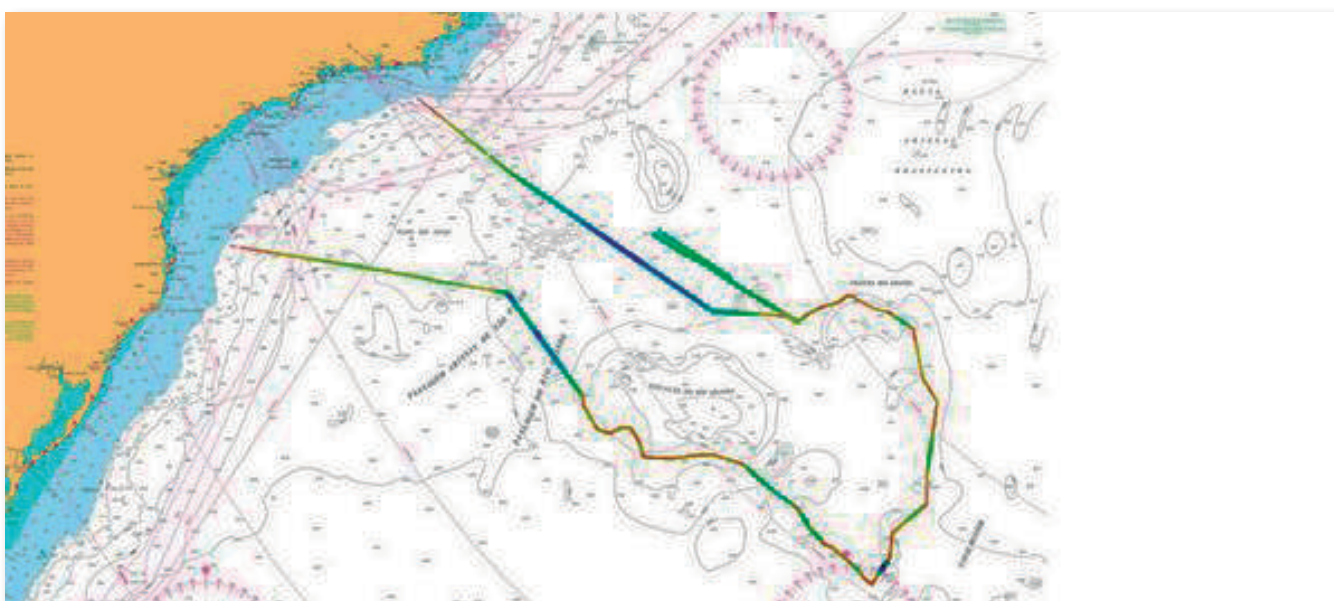


Figura 7 – Área da sondagem com ecobatímetro EM-122 e SBP-120 durante a comissão LEPLAC-ERG



Figura 8 – Dispositivo da boia Spotter V2 lançado pelo Navio Hidroceanográfico “Cruzeiro do Sul”

Entre os dias 12 a 14 de abril de 2022, o NHo “Cruzeiro do Sul” realizou a Comissão EXPEDIÇÃO IV (SE/E), cujo propósito era realizar o recolhimento da

boia BMO – BR do Projeto “Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica – Observacional (REMO)”, que se encontrava à deriva na Baía de Campos.



Figura 9 – Boia BMO – BR do Projeto “Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica – Observacional (REMO)” recolhida na Baía de Campos

Entre os dias 3 de junho a 9 de agosto de 2022, o NHo “Cruzeiro do Sul” realizou a Comissão PRO AMAZÔNIA AZUL I, nos litorais norte e nordeste do país. A Operação teve como objetivo a caracterização fisiográfica do talude continental adjacente à Baía Potiguar, por meio de geomapeamento, a fim de

avaliar continuidade dos vales na região, os parâmetros que controlam a formação dos cânions submarinos e avaliar o papel da história de variações do nível do mar e também capacitar instituições de pesquisa marinha brasileiras para realizar estudos do substrato marinho da Plataforma Continental Jurídica Brasileira



(PCJB) e de regiões oceânicas adjacentes, por meio da utilização de sistemas de batimetria multifeixe de grande porte e de sistemas móveis de sonografia, batimetria multifeixe e sísmica.

Além disso, a Comissão visou atender ao Plano de Trabalho de Hidrografia 2020-2023 (PTHidro), com o propósito de caracterizar feições submarinas

na margem continental brasileira, que serão nomeadas a partir da elaboração de propostas no Subcomitê de Nomenclatura de Feições Submarinas (SCUFN) da GEB-CO, contemplou o apoio à operação PRO AMAZÔNIA AZUL, da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) e apoiou a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

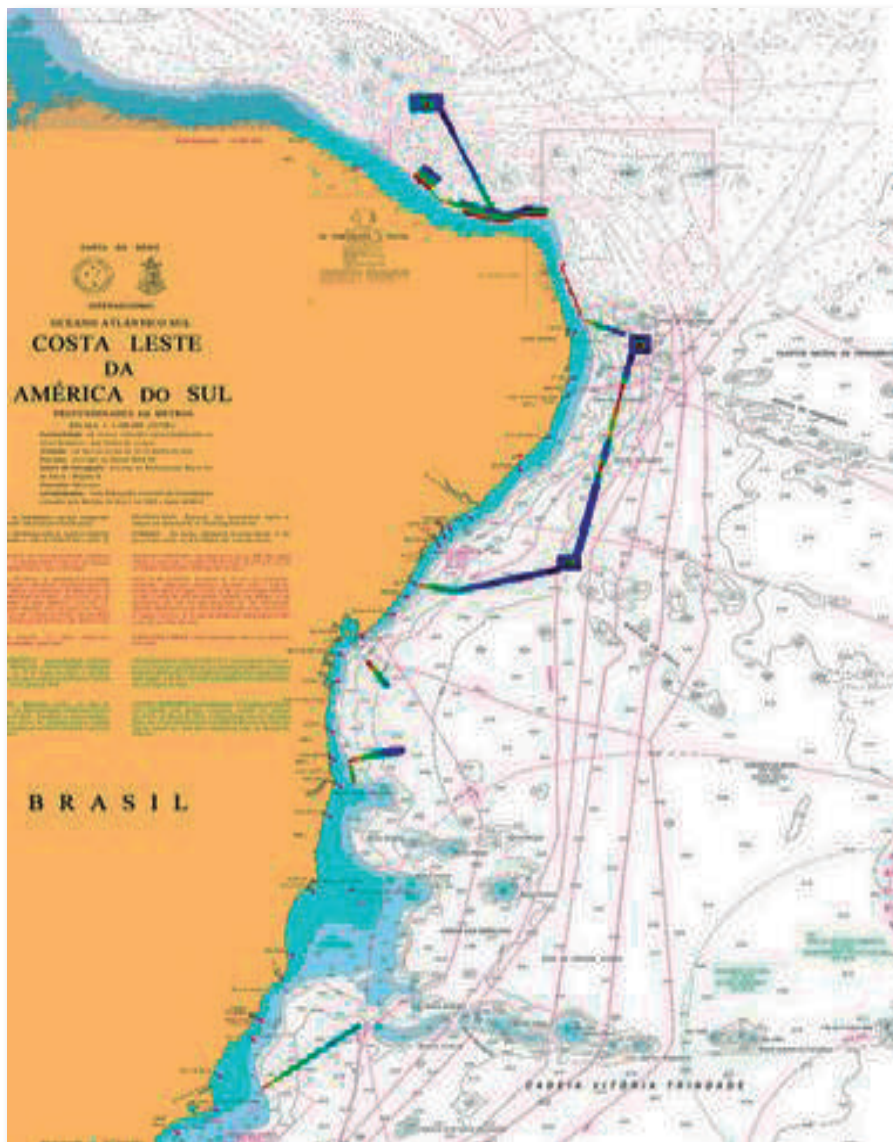
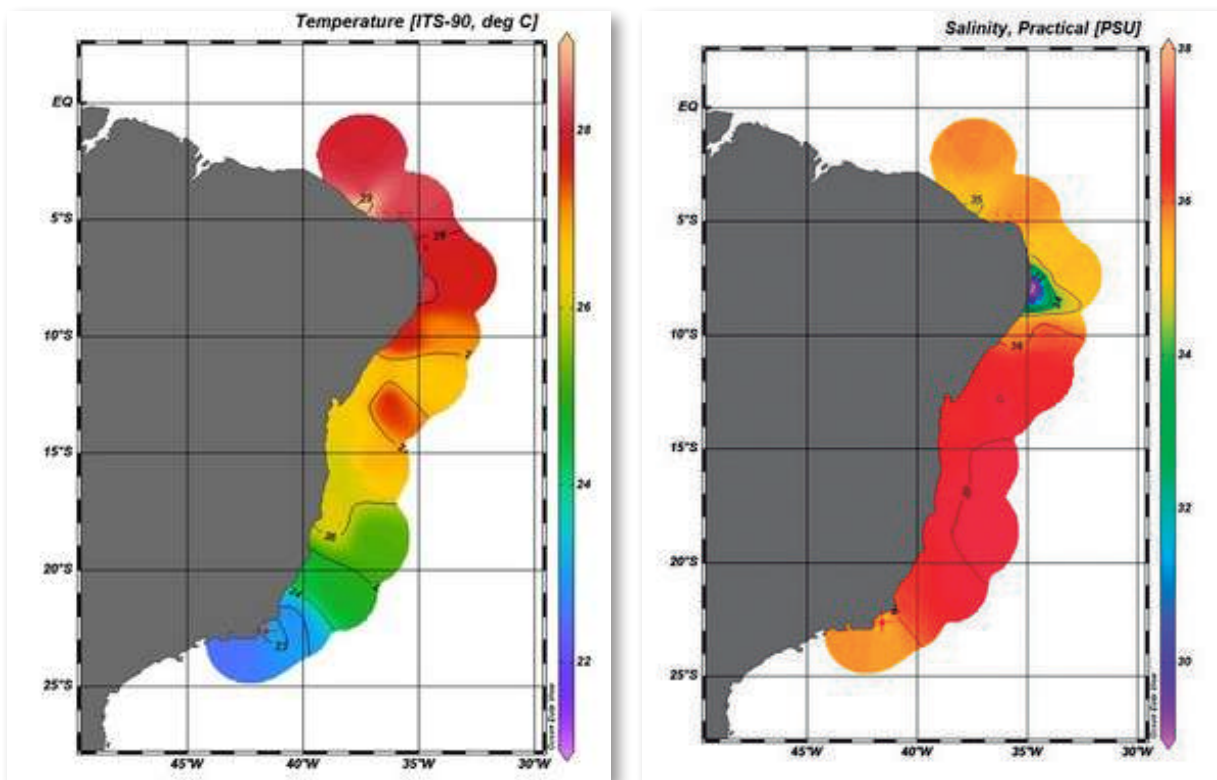


Figura 10 – Áreas da sondagem com sistemas de batimetria multifeixe, sísmica e sonografia



Figuras 11 e 12 – Dados coletados por meio do Termosalinógrafo – temperatura (à esquerda) e salinidade (à direita)

Entre os dias 22 a 26 de agosto de 2022, o Navio realizou a Comissão SINALIZAÇÃO Náutica Sudeste V. Na ocasião, o NHO “Cruzeiro do Sul” apoiou

o Farol Macaé com reabastecimento de Óleo Diesel Marítimo para aumentar a sua autonomia operacional, contribuindo para a segurança da navegação na área.



Figura 13 – Farol de Macaé



Entre os dias 7 de novembro a 8 de dezembro de 2022, o NHO “Cruzeiro do Sul” realizou a comissão COSTA SUL (Primavera), na região litorânea pertencente aos estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. A Comissão teve como propósito realizar a coleta de dados ambientais em apoio à produção de informações oceanográficas, meteorológicas e hidrográficas voltadas ao Setor Operativo e de Segurança da Navegação, para as pesquisas da comunidade científica e incremento das informações do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), em cumprimento

ao Plano de Trabalho de Meteorologia Marinha e Oceanografia (PTMETOC).

Durante a Comissão, foram realizadas 112 estações oceanográficas, com profundidades atingidas variando de 17 a 2300 metros, e adquiridos perfis de temperatura, salinidade, oxigênio e velocidade do som. Também foram realizadas 277 coletas de amostras de água do mar, efetuadas 15 medições de perfis verticais de velocidade do som na água utilizando perfiladores XBT e realizadas medições da salinidade na superfície por meio do Termosalinógrafo (TSG).

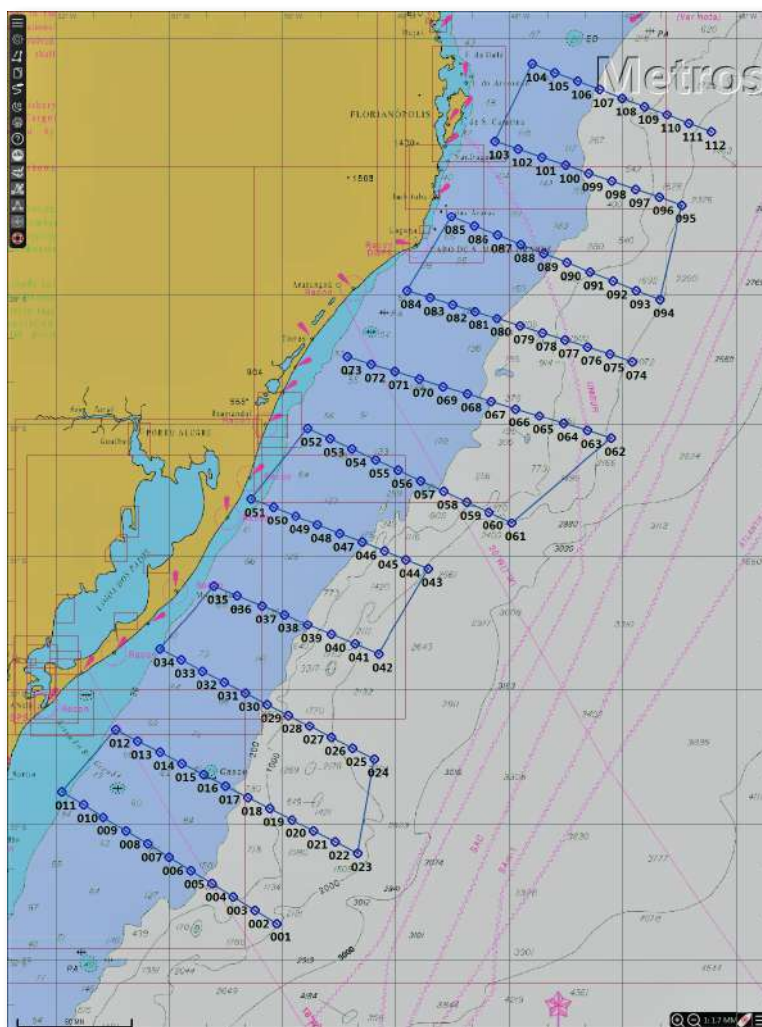


Figura 14 – Disposição das estações oceanográficas realizadas na comissão Costa Sul (Primavera)

NAVIO DE PESQUISA HIDROCEANOGRÁFICO “VITAL DE OLIVEIRA”



Figura 1 – NPqHo “Vital de Oliveira”

O Navio de Pesquisa Hidroceano-gráfico “Vital de Oliveira” possui a missão de executar Levantamentos Hidroceano-gráficos, realizar coleta de dados ambientais e apoiar pesquisas científicas em áreas marítimas de interesse, além de apoiar tarefas afetas aos auxílios à navegação, a fim de contribuir para o cumprimento das atividades relacionadas à DHN.

De 4 de novembro de 2021 a 3 de setembro de 2022, desde sua incorporação à Armada em 24 de março de 2015, o Navio cumpriu o 1º Período de Manutenção Geral (PMG) de seus sistemas vitais, previsto em seu ciclo operativo, tendo permanecido docado no dique “Almirante Régis” do Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ) entre



30 de novembro de 2021 e 1º de abril de 2022.

Após intensa e complexa rotina de manutenções do PMG, realização de Experiência de Máquinas e Ciclo de Alinhamento de Sistemas, o H-39 foi aprovado para operações no mar e com aeronave em Inspeção Operativa e Vistoria de Segurança de Aviação (VSA), respectivamente, conduzidas pela CIAA do GNHo e por equipe da DAerM, visando à contínua contribuição ao desenvolvimento do País, por meio do apoio à pesquisa no mar.

De 21 de setembro a 30 de outubro de 2022, desde o retorno operativo do Navio, foi realizada, na área de atuação compreendida pelo Litoral NE e ASPSP, a 1ª campanha científica por meio da comissão COMITÊ GESTOR I/2022, concebida para atender às demandas do MCTI, como uma das três instituições participantes integrantes do Acordo de Cooperação para Governança do Navio, por meio de projetos aprovados pelos Comitês Gestor e Científico.

Na sequência, entre 8 de novembro a 21 de dezembro de 2022, efetuou-se a comissão COMITÊ GESTOR II/2022, particionada em duas pernas de atendimento a comitativas representantes do SGB-CPRM e PETROBRAS, respectivamente, com áreas de atuação situadas na região da Elevação do Rio Grande (ERG) e na Bacia de Santos.

A 1ª fase da comissão, atuante na porção norte da ERG, dedicou-se à continuidade do Levantamento geofísico conduzido pelo SGB-CPRM com o propósito de serem gerados elementos que

permitam, por meio da análise mineralógica, subsidiar juridicamente junto à CNUDM o pleito de anexação da referida área à Plataforma Continental do Brasil, de modo que seu limite atual estenda-se para além das 200 Milhas Náuticas da Zona Econômica Exclusiva.

Na 2ª fase, os estudos encontravam-se inseridos no contexto do projeto internacional *iAtlantic*, voltado à compreensão dos fatores que controlam a distribuição, estabilidade e vulnerabilidade dos ecossistemas profundos do Atlântico, cujas atividades concentraram-se no extremo Sul da Bacia de Santos, na área de quebra da plataforma continental, contando com a participação de um representante da PETROBRAS e demais instituições de pesquisa convidadas.

Nesta última comissão realizada, o “Polvo Hidrográfico” atingiu as expressivas marcas de 524 embarques de pesquisadores provenientes de 44 instituições de pesquisa do País e do exterior, além de 900 dias de mar navegados em 7 anos de operação.

O desempenho bem-sucedido do NPqHo “Vital de Oliveira” ao longo do ano de 2022 na execução das atividades que lhe foram impostas validou todo o seu potencial científico ao conferir confiabilidade aos seus sistemas vitais atualmente revisados por meio de obras contempladas por extenso PMG, além da elevação do grau de aprestamento da tripulação, ratificando-o como moderna plataforma de apoio à pesquisa nacional.

“Pesquisa no Mar? Vital, Navegar!”



Figura 2 – Formatura no convoo do NPqHo “Vital de Oliveira”



Figura 3 – Realização de atividade de geologia



NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO “AMORIM DO VALLE”



Figura 1 – Navio Hidroceanográfico “Amorim do Valle”

Entre os dias 4 e 18 de agosto de 2022, o Navio realizou o geomapeamento na área de fundeio na Baía de Guanabara, com emprego de Sonar de Varredura Lateral (SVL) utilizando a lancha “Acrux”. A lancha teve

como principal tarefa realizar varredura, a fim de identificar perigos ou quaisquer feições que possam comprometer o fundeio dos navios participantes da UNITAS LXIII/2022, garantindo o seu imageamento integral.



Figura 2 – Área de operação na Baía de Guanabara

Entre os dias 24 de outubro e 4 de novembro de 2022, o Navio realizou o LH no canal de navegação entre as ilhas do Engenho e das Flores. Os dados batimétricos foram coletados utilizando a lancha hidrográfica “Cehili”, equipada com o ecobatímetro multifeixe

EM-2040. O Levantamento teve como propósito subsidiar a tomada de decisão quanto à manutenção da interdição do canal entre a Ilha do Engenho e a Base de Fuzileiros Navais na Ilha das Flores (BFNIF) e a atualização da carta náutica nº 1512.

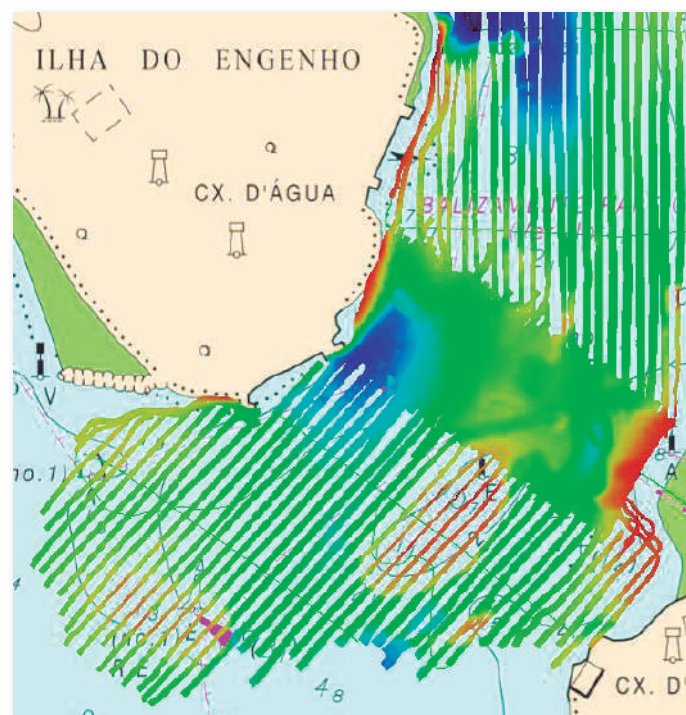


Figura 3 – Área de operação nas proximidades da ilha do Engenho



NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO “TAURUS”



Figura 1 – Navio Hidroceanográfico "Taurus"

No período compreendido entre os dias 16 de maio e 1º de julho de 2022, uma equipe volante do Navio Hidroceanográfico "Taurus" realizou a Comissão Levantamento Hidrográfico (LH) no Lago de Palmas no Estado de Tocantins (TO), com o objetivo de gerar subsídios para confecção de Planta Batimétrica da área principal, proximidade da Ponte Fernando Henrique Cardoso, Rodovia TO-080, e

da área expedita, talvegue do Rio Tocantins, com emprego de Sonar de Varredura Lateral (SVL), além de estudos a fim de implantar sinais náuticos, que auxiliem o usuário sobre existência de perigos à navegação, contribuindo para a segurança da navegação nessa região.

Durante a comissão, foram adquiridos dados de profundidade com a utilização do ecobatímetro monofeixe portátil

EA-440 e o sonar de varredura lateral *EdgeTech 4125*, instalados em uma LAEP-07 da Capitania Fluvial do Araguaia-Tocantins (CFAT) (Figuras 2 e 3), dentro do período de 22 (vinte e dois) dias de efetiva sondagem.

As informações a respeito da maré na região foram obtidas por meio de 2 (duas) estações fluviométricas instaladas (CFAT e Porto Nacional) com 40 dias de observação e uma estação fluviométrica adotada (Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães – UHE Lajeado Montante) com histórico de medições desde maio de 2017.

Os dados fluviométricos a montante da Barragem do Lajeado durante todo o período do Levantamento, além dos dados fluviométricos históricos foram fornecidos pela empresa *Investco S.A.*

Para a coleta de dados e atualização das informações referentes à geodésia, trabalhos de campo foram realizados permitindo a determinação de 13 coordenadas por rastreamento por satélite. As atividades de nivelamento geométrico (Figura 4) e rastreamento cinemático foram essenciais para a atualização da situação dos marcos testemunhos e referências de nível.

A realização do Levantamento Hidrográfico (LH) permitiu a aquisição de elementos que subsidiarão a construção da Planta Batimétrica (figura 5) da área principal, proximidade da Ponte Fernando Henrique Cardoso, Rodovia TO-080, e da área expedita, talvegue do Rio Tocantins, atendendo ao III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro (PCNB).

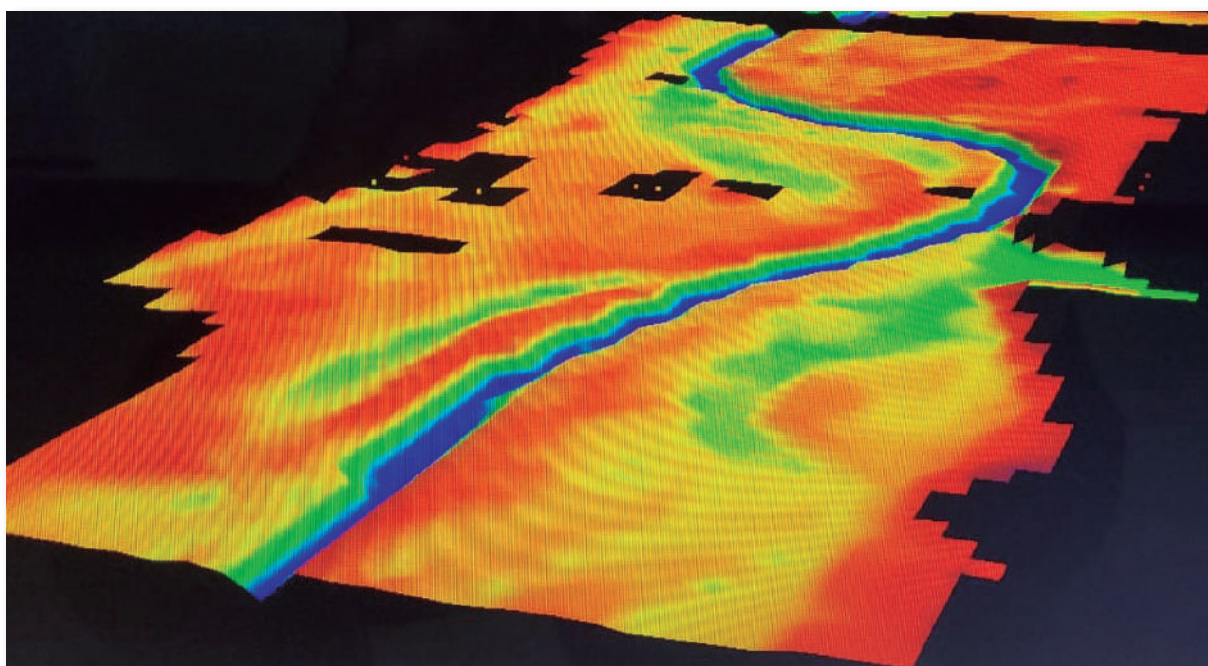


Figura 2 – Área do Levantamento Hidrográfico

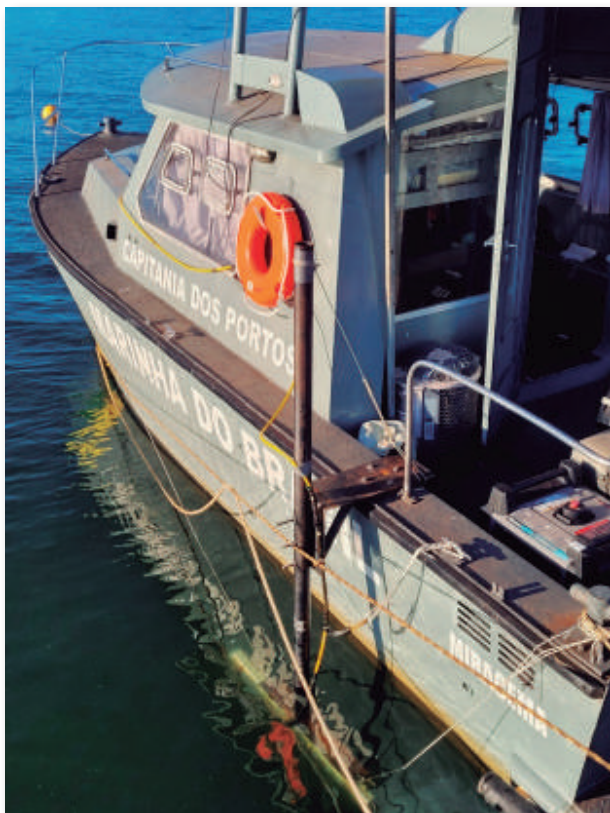


Figura 3 – LAEP-07 da Capitania Fluvial do Araguaia-Tocantins (CFAT) utilizada como Embarcação de sondagem com haste lateral para fixação do transdutor do ecobatímetro portátil

Figura 4 – Atividades de nivelamento geométrico na Capitania Fluvial do Araguaia-Tocantins (CFAT)

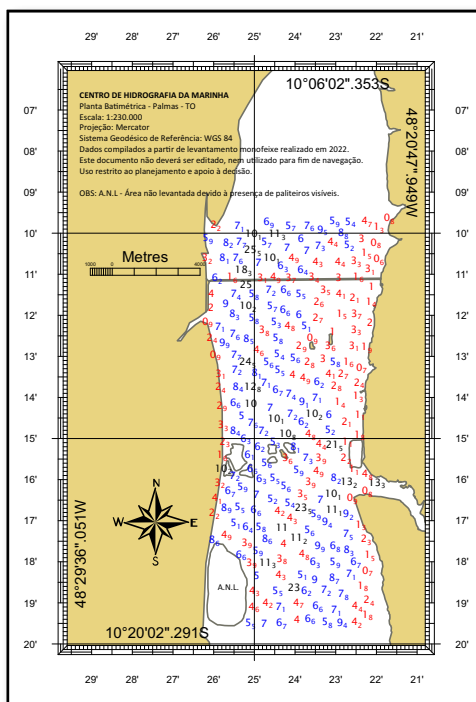


Figura 5 – Planta Batimétrica

AVISO DE PESQUISA HIDROCEANOGRÁFICO “ASPIRANTE MOURA”



Figura 1 – AvPqHo “AspMoura” em apoio à instrução

O Aviso de Pesquisa Hidroceano-gráfico “Aspirante Moura” tem como missão: “efetuar Levantamentos Hidroceano-gráficos, coleta de dados ambientais e tarefas de Apoio logístico Móvel, a fim de contribuir para a segurança da navegação na área marítima de interesse do Brasil e vias navegáveis interiores; a execução de projetos nacionais de pesquisa em Águas Jurisdicionais Brasileiras e dos resultados de compromissos internacionais; a

formação de pesquisadores, professores e alunos nas disciplinas relacionadas ao mar; e a aplicação do Poder Naval e Marítimo. Contribuir para hidrografia, oceanografia e auxílios à navegação, bem como dar apoio às atividades de ensino e suporte para pesquisas de campo às diversas universidades parceiras da Marinha”.

Durante o ano de 2022, o Navio realizou diversos Levantamentos Hidroceano-gráficos, a exemplo de: dois Levantamentos



Hidroceanográficos na área da Base de Submarinos da Ilha da Madeira (BSIM), com o propósito de subsidiar as tarefas da Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN); e Levantamento Hidroceanográfico de Fim de Curso (LHFC-2022), com o objetivo de apoiar instruções aos futuros Hidrógrafos, por meio da obtenção de dados hidroceanográficos e de auxílios à navegação dentro da Baía de Guanabara. Ademais, o Navio

prestou apoio ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM), com a aquisição de dados oceanográficos e acústicos a partir do lançamento de fontes acústicas, hidrofones, conjunto CTD-Rossete e XBT frontais na área de plataforma próxima à Ilha do Cabo Frio, possibilitando a realização de estudos relacionados à oceanografia e acústica submarina na região.

O “Arraia” permanece pronto para cumprir as demandas finalísticas da DHN!



Figura 2 – Equipe de sondagem de bote do H-11 na BSIM



Figura 3 – Navio rebocando um sonar de varredura lateral na bacia de manobra da BSIM



Figura 4 – Navio realizando atividades de oceanografia nas proximidades de Arraial do Cabo



Figura 5 – AvPqHo "AspMoura" realizando sondagem batimétrica nas proximidades do Museu de Arte Contemporânea em Niterói



CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO NORTE (CHN-4)



Figura 1 – Meios Subordinados ao CHN-4

Os navios subordinados ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte (CHN-4) cumpriram as comissões previstas no Plano de Trabalho de Hidrografia de 2022: ao longo do ano, foram percorridas 10.500 milhas náuticas, com cerca de 4.000 km² de áreas sondadas.

O CHN-4 atualizou 17 cartas náuticas e publicou a carta 4020A – Porto de Santarém. Os trabalhos também incluíram o restabelecimento de 29 boias e as manutenções de 23 faróis e faroletes. Os

navios realizaram Levantamentos Hidrográficos na barra Norte do Rio Amazonas e na região dos “Estreitos” – diversos furros hidroviários do sudoeste do Arquipélago do Marajó, no Pará.

Participaram dos Levantamentos o Navio Hidroceanográfico “Garnier Sampaio”, o Navio Hidrográfico Balizador “Tenente Castelo”, o Aviso Hidroceanográfico Fluvial “Rio Tocantins”, Aviso Hidroceanográfico Fluvial “Rio Xingu” e Aviso Balizador “Denébola”.

NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO “GARNIER SAMPAIO”

O Navio Hidroceanográfico “Garnier Sampaio”, subordinado ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte, efetuou, entre os dias 1º e 14

de dezembro de 2022, Levantamento Hidrográfico no Rio Amazonas entre Ilhas Pedreiras e Canal Grande do Curuá.



Figura 1 – Navio Hidroceanográfico “Garnier Sampaio”

O Levantamento Hidrográfico coletou dados importantes para atualização das Cartas 221, 203, 202 e 21300, abrangendo um total de 1.070,0 km²

de área sondada. O LH contribuiu para uma navegação mais segura na região, em face do grande fluxo de Navios Mercantes.



Figura 2 – Camarim de navegação do Navio Hidroceanográfico “Garnier Sampaio”



NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR “TENENTE CASTELO”

O Navio Hidrográfico Balizador “Tenente Castelo”, subordinado ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte, efetuou, entre os

dias 3 de novembro e 23 de dezembro de 2022, Levantamento Hidrográfico no Canal Grande do Curuá (Barra Norte).



Figura 1 – Navio Hidrográfico Balizador “Tenente Castelo”

O Levantamento Hidrográfico coletou dados importantes para atualização das Cartas 202 e 221 atendendo as

demandas do setor aquaviário para atualização das profundidades da Foz do Rio Amazonas.

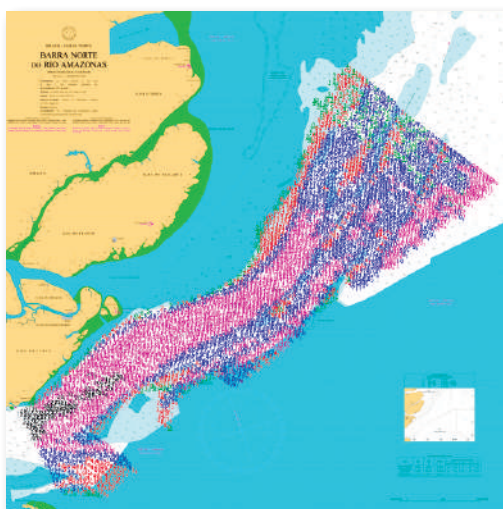


Figura 2 – Área de Levantamento no Canal Grande do Curuá

AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “RIO XINGU”

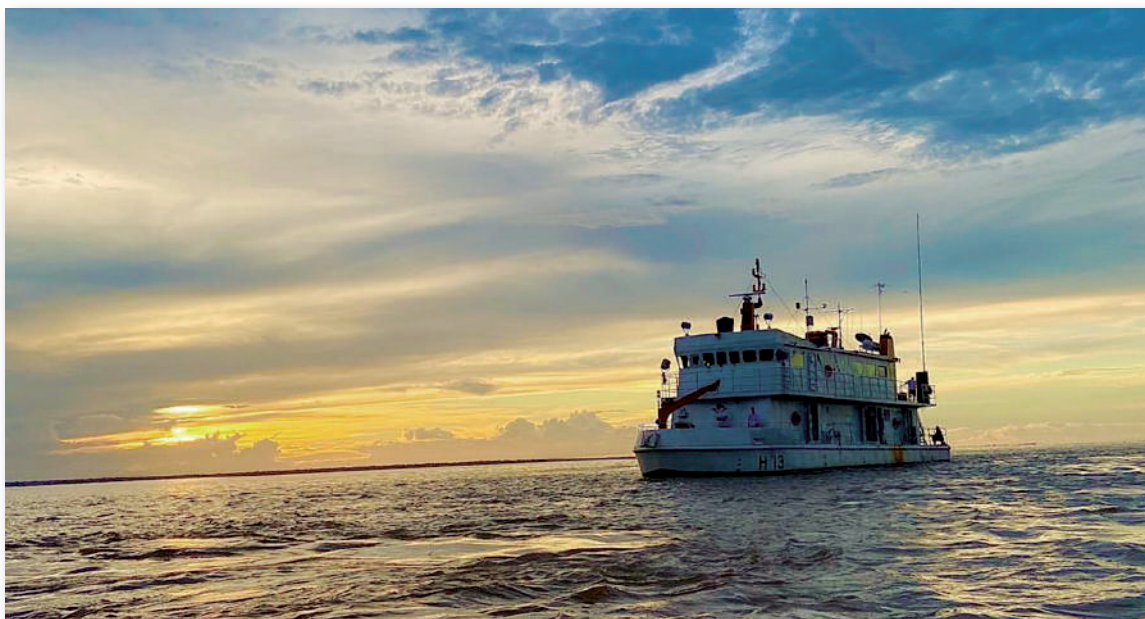


Figura 1 – Aviso Hidroceanográfico Fluvial “Rio Xingu”

O Aviso Hidroceanográfico Fluvial “Rio Xingu”, subordinado ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte, efetuou, entre os dias 10 de fevereiro e 17 de março de 2022, Levantamento Hidrográfico Monofeixe na Baía de Macapá no Banco do Fugitivo. Os Levantamentos Hidrográficos tiveram como fim a incrementação da segurança da navegação e aquisição de dados para subsídio das novas edições das Cartas Náuticas 204, 206 constantes no III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro.

Entre os dias 13 de julho e 7 de setembro de 2022, efetuou Levantamento Hidrográfico Monofeixe no rio Pará (entre Baía das Bocas e Foz do Rio Tocantins).

Os Levantamentos Hidrográficos tiveram como fim a incrementação da segurança da navegação e aquisição de dados para subsídio das novas edições das Cartas Náuticas 305, 306 e 4341 constantes no III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro.

Entre os dias 22 de abril e 30 de maio de 2022, realizou Levantamento Hidrográfico Monofeixe na região dos Estreitos. Os Levantamentos Hidrográficos tiveram como fim a incrementação da segurança da navegação e aquisição de dados para subsídio das novas edições das Cartas Náuticas 4347, 4348, 4349, 4350, 4114 e 4113 constantes no III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro.



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “RIO TOCANTINS”



Figura 1 – Aviso Hidroceanoográfico Fluvial “Rio Tocantins”

O Aviso Hidroceanoográfico Fluvial “Rio Tocantins”, subordinado ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte, efetuou, entre os dias 11 de janeiro a 23 de março de 2022, Levantamento Hidrográfico Monofeixe no Rio Amazonas, no Canal de Pracuubinhas.

Os Levantamentos Hidrográficos tiveram como fim a incrementação da segurança da navegação e aquisição de dados para subsídio da nova edição da Carta Náutica 4101A, constantes no III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro.

O Aviso Hidroceanoográfico Fluvial “Rio Tocantins”, subordinado ao Centro de Hidrografia e Navegação do Norte, efetuou, entre os dias 12 de junho a 25 de julho de 2022, Levantamento Hidrográfico na Região dos Estreitos.

Os Levantamentos Hidrográficos tiveram como fim a incrementação da segurança da navegação e aquisição de dados para subsídio da nova edição da Carta Náutica 4347, 4348, 4349, 4350, 4114, 4113 constantes no III Plano Cartográfico Náutico Brasileiro.

CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO OESTE (CHN-6)

AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “CARAVELAS”



Figura 1 – AvHoFlu “Caravelas”

Após o período pandêmico da COVID19, o AvHoFlu “Caravelas” realizou, entre os dias 18 de abril e 10 de junho de 2022, o Levantamento Hidrográfico (LH) Sondope, fruto de um acordo bilateral entre os governos

do Brasil e Paraguai. A Comissão visa contribuir para a realização de serviços de infraestrutura hidroviária, sobretudo nas áreas cartografadas exclusivamente paraguaias da Hidrovia Paraguai-Paraná (HPP). O Levantamento abrangeu o



trecho entre as cidades de Porto Murtinho (BRA) e Assunção (PAR), no qual foram coletados, em águas nacionais e estrangeiras, dados ambientais que possibilitaram a atualização/construção de 27 cartas náuticas, totalizando

195,0 km² de área sondada. A Sondope, além de contribuir para a segurança da navegação e salvaguarda da vida humana, promove o estreitamento de laços, integração e interoperabilidade com o país vizinho.

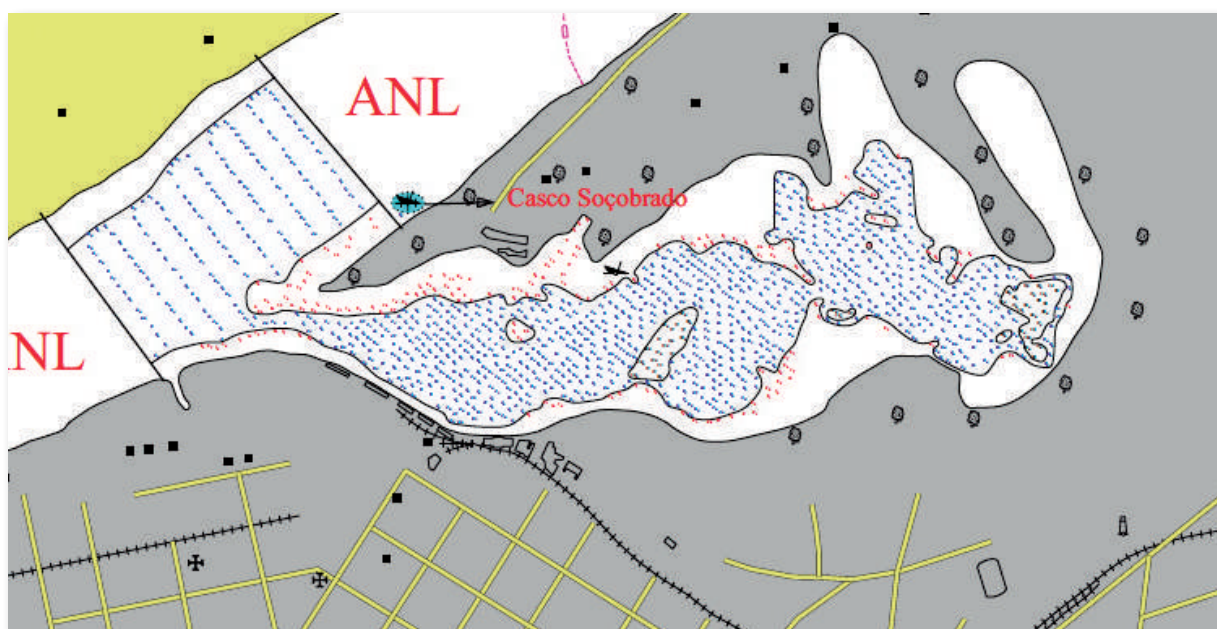


Figura 2 – Folha de Bordo da BAHIA DE ASUNCIÓN (PAR) produzida durante o LH SONDOPE

Em cumprimento ao Plano de Trabalho de Hidrografia (PTHidro), durante os meses de agosto e setembro, realizou-se a comissão Levantamento Hidrográfico Murtinho, a fim de permitir a atualização da batimetria do Tramo Sul do Rio Paraguai. Foi levantada a área entre as cidades de Ladário-MS e Porto Murtinho-MS, totalizando 123,0 km² de área sondada e subsidiando

elementos para a atualização de 13 documentos náuticos. Por meio desta comissão, contribuiu-se diretamente na segurança da navegação e salvaguarda da vida humana dos comboios que navegam no tramo sul, colaborando para a diminuição do custo final de produtos, fomentação da economia do Brasil, além de gerar empregos e o desenvolvimento da região.



Figura 3 – Lanchas Hidrográficas realizando coleta de dados durante o LH Murtinho

No período de 28 de novembro a 11 de dezembro, o AvHoFlu “Caravelas” realizou o Levantamento Hidrográfico (LH) Cáceres aliado à inspeção do balizamento da hidrovia Paraguai-Paraná (HPP) ao longo Tramo Norte do rio Paraguai. Devido à seca histórica observada neste período, a comissão limitou-se ao trecho compreendido entre os municípios de Ladário-MS e Bela Vista do Norte-MS. O LH obteve elementos para atualização/construção de 8 cartas náuticas, totalizando 17,3

km² de área sondada. Tal campanha mostrou-se necessária devido às alterações significativas ocorridas tanto no leito do rio como nas margens, em períodos relativamente curtos, em virtude da dinâmica hídrica sazonal da HPP. A garantia da segurança da navegação na hidrovia contribui para o desenvolvimento econômico e social da região, uma vez que fortalece o transporte fluvial e demarca a presença do Brasil em sua estratégica fronteira oeste.



CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO NOROESTE (CHN-9)

NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “RIO BRANCO”

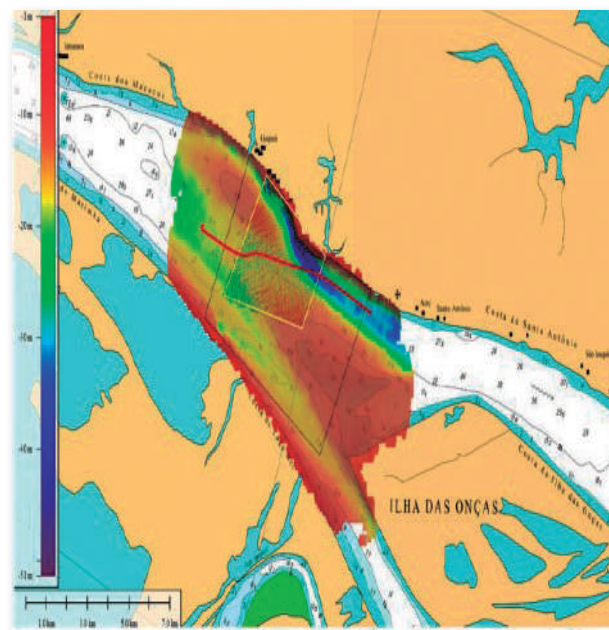
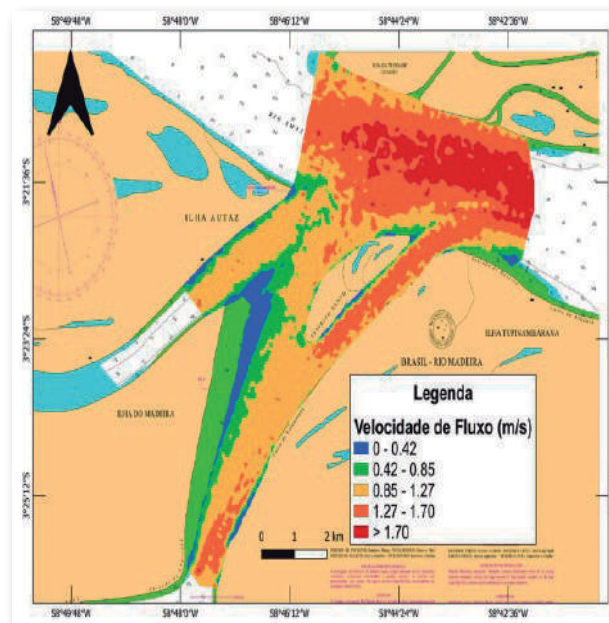


Figura 1 – Navio Hidroceanográfico Fluvial “Rio Branco”



Figura 2 – Levantamento Hidrográfico Madeira I

No período de 10 de janeiro a 17 de fevereiro de 2022, foi realizado o Levantamento Hidrográfico monofeixe na calha do rio Madeira, no trecho compreendido entre o Porto Curuçá e a Costa Santa Rosa, com o propósito de gerar subsídios para a atualização das cartas náuticas nº 4733, 4734 e 4735, totalizando 104,55 km² de área sondada, perfazendo um total de 39 dias de mar.



Figuras 3 e 4 – PRO AMAZÔNIA AZUL II

No período de 30 de maio a 13 de junho de 2022, foi realizada a Comissão PRO AMAZÔNIA AZUL II, em que o navio efetuou a aquisição conjunta de dados de batimetria e de corrente, com ecobatímetro multifeixe e ADCP, em apoio à pesquisa do Serviço Geológico do

Brasil (CPRM) na área do “Tabocal”, localizado, aproximadamente, 24MN a jusante da cidade Manaus, no rio Amazonas, em atendimento ao PRO AMAZÔNIA AZUL da SECIRM, totalizando 12,00 km² de área sondada, perfazendo um total de 15 dias de mar.



Figura 5 – Farelex Amazonas I e II

Nos períodos de 24 a 29 de outubro de 2022 e de 16 a 21 de novembro de 2022, foram realizadas as Comissões FAROLEX AMAZONAS I e FAROLEX AMAZONAS II, respectivamente. Foram

realizadas as manutenções dos Faroletes Jacaré, Moronas e Porto Equador, bem como inspeção em todos os sinais náuticos da área de Manaus, perfazendo um total de 12 dias de mar.

AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “RIO NEGRO”



Figura 1 – Aviso Hidroceanoográfico Fluvial “Rio Negro”

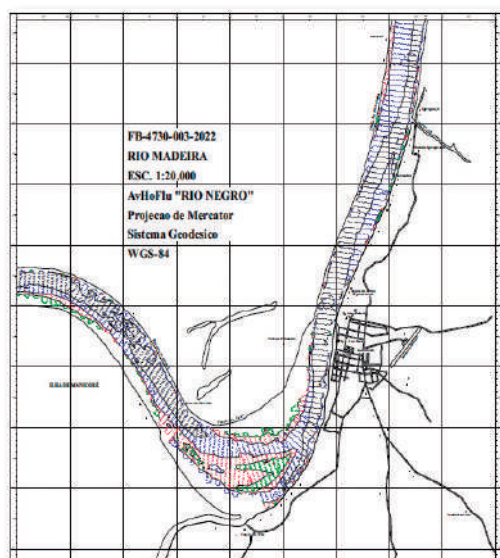


Figura 2 – Levantamento Hidrográfico Madeira II

No período de 7 de fevereiro a 28 de março de 2022, foi realizado Levantamento Hidrográfico monofeixe no rio Madeira, no trecho compreendido entre o Igarapé-Açu e o Porto Curuçá, no intuito de gerar subsídios para a atualização das cartas náuticas 4730, 4731 e 4732. Nesta comissão, foram adquiridos dados de 47MN da calha do rio, totalizando uma área de 109 km² sondados, perfazendo 50 dias de mar e 1.959 MN navegadas.

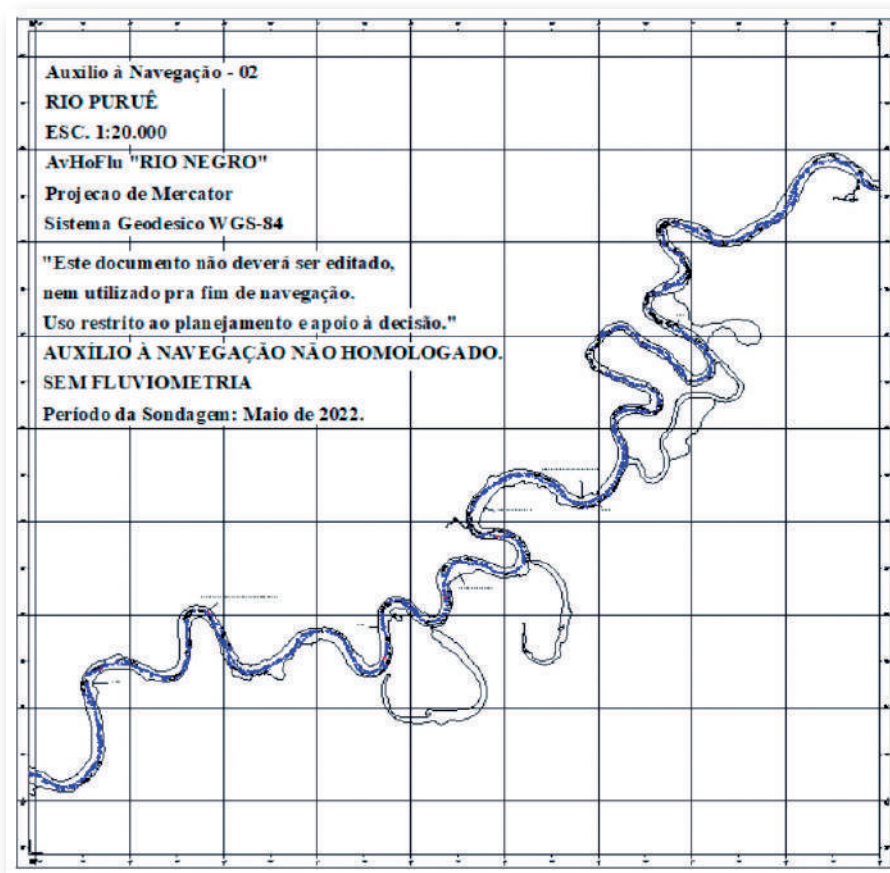


Figura 3 – Levantamento Hidrográfico Puruê

No período de 29 de abril a 26 de maio de 2022, foi realizada sondagem operativa no rio Puruê, em apoio às Operações “Órion” e “Ágata”, no trecho compreendido entre a foz do referido rio e a fronteira entre o Brasil e a Colômbia, para a confecção de produtos de auxílio à navegação, auxílio à tomada de decisão e coleta de dados batimétricos. Nesta comissão, o navio percorreu um total de 1.820 MN navegadas, perfazendo 28 dias de mar.

No período de 22 de agosto a 19 de outubro de 2022, o navio prestou apoio à pesquisa da Universidade Federal do

Amazonas na área da foz do rio Madeira, em atendimento ao projeto “PRO AMAZÔNIA AZUL”, coordenado pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Em proveito da comissão, foi realizado Levantamento Hidrográfico monofeixe na confluência dos rios Solimões e Negro, bem como no rio Amazonas, a fim de gerar subsídios para a atualização das cartas náuticas 4031 e 4032. Nesta oportunidade, foram adquiridos dados de 96 MN das calhas dos rios, totalizando uma área de 585,9 km² sondados, perfazendo 50 dias de mar e 880 MN navegadas.



Figura 4 – PRO AMAZÔNIA AZUL V

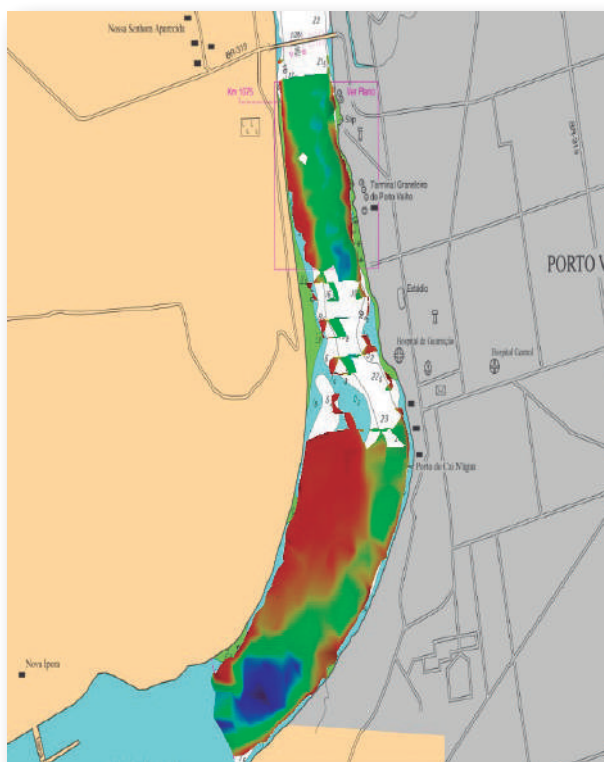


Figura 5 – Levantamento Hidrográfico Madeira III

No período de 1º de novembro a 16 de dezembro de 2022, foi realizado Levantamento Hidrográfico monofeixe no rio Madeira, nos trechos críticos situados entre as cidades de Manicoré-AM e Porto Velho-RO, com o objetivo de gerar subsí-

dios para a atualização das cartas náuticas 4738, 4749, 4750, 4752 e 4753. Nesta comissão, foram adquiridos dados de 405 MN da calha do rio, totalizando uma área de 77,64 km² sondados, perfazendo 46 dias de mar e 1.310 MN navegadas.



AVISO HIDROCEANOGRÁFICO FLUVIAL “RIO SOLIMÕES”



Figura 1 – Aviso Hidroceanoográfico Fluvial “Rio Solimões”

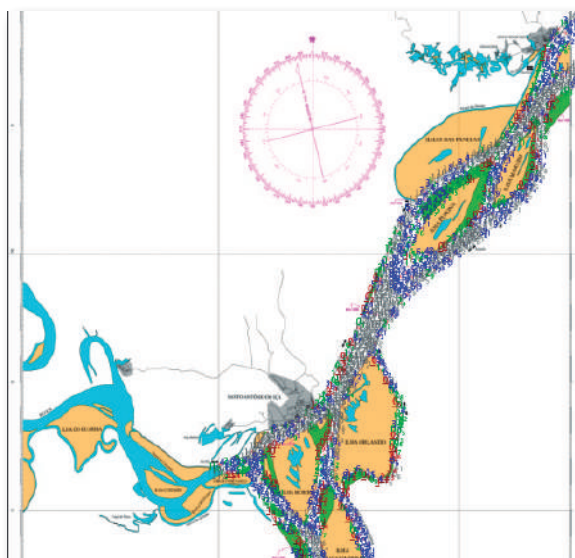


Figura 2 – Levantamento Hidrográfico Solimões I

No período de 20 de janeiro a 25 de março de 2022, foi realizado Levantamento Hidrográfico monofeixe na calha do Rio Solimões compreendida entre a Ilha Caité e São Paulo de Olivença-AM, com o intuito de atualizar as cartas náuticas nº 4067, 4068, 4069 e 4070. Nesta comissão, foram adquiridos dados de 130,6 MN da calha do rio, totalizando uma área de 562,4 km² sondados, perfazendo 65 dias de mar.



Figura 3 – AvHoFlu “Rio Solimões”

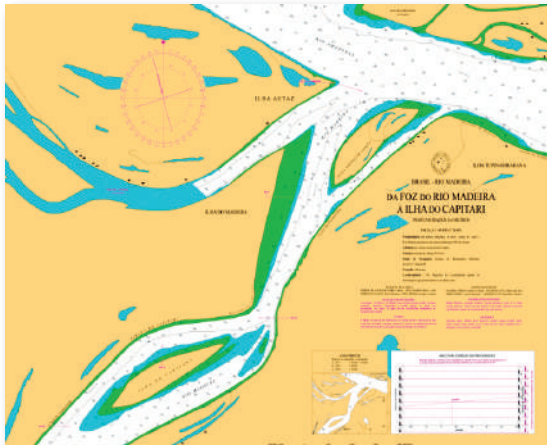


Figura 4 – Pro Amazônia Azul III

No período de 27 de agosto a 20 de setembro de 2022, o navio prestou apoio à pesquisa da Universidade Federal do Amazonas na área da foz do Rio Madeira, compreendida entre a Estação Naval do Rio Negro e Itacoatiara-AM (milhagem 100 do Rio Amazonas). Em atendimento ao Pro Amazônia Azul da SECIRM e em proveito da Comissão, também foi realizado LH para atualização da Carta 4031, perfazendo 16,5 dias de mar.

No período de 19 a 26 de agosto de 2022, o navio prestou apoio ao Curso de Medições Hidrométricas da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, na área compreendida entre a Estação Naval do Rio Negro e Manacapuru-AM (milhagem 54 do Rio Solimões). Nesta comissão, foi utilizada a Lancha “ARI-PUANÃ” para realizar sondagem multi-feixe nos trechos solicitados pelos pesquisadores, perfazendo 8 dias de mar.



SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NÁUTICA DO NORDESTE (SSN-3)

NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR “COMANDANTE MANHÃES”



Figura 1 – Navio Hidrográfico Balizador “Comandante Manhães”

O Navio Hidrográfico Balizador “Comandante Manhães” tem a missão de apoiar nas tarefas de implementação, operação, manutenção, instalação ou desativação e fiscalização de sinais de auxílio à navegação de responsabilidade do Serviço de Sinalização Náutica do

Nordeste (SSN-3), a fim de contribuir para a segurança da navegação na área do Comando do 3º Distrito Naval. Além das referidas fainas nos sinais náuticos, ainda presta apoio nas manutenções da Estação Científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.



Figura 2 – Lançamento de boia especial (*Spotter V2*)

No período compreendido entre os dias 1º e 10 de junho de 2022, o Navio realizou a comissão de manutenção de Faróis no Arquipélago de Fernando de Noronha – PE (Rodízio da BL Santo Antônio, manutenção preventiva nos Faróis Fernando de Noronha e Rata). Além

disso, foi efetuado o lançamento de uma boia especial (*Spotter V2*), com objetivo de coleta de dados meteoceanográficos, nas coordenadas de latitude $03^{\circ}47'54.0''$ S e longitude $032^{\circ}22'17.5''$ W e a instalação de marégrafo em apoio ao Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).



Figura 3 – Estrutura do marégrafo



Figura 4 – Régua instalada na parte externa do cais



A reocupação de uma estação maregráfica contribuirá para a realização dos Levantamentos Hidrográficos conduzidos pela MB, aumentando a segurança da navegação e a qualidade dos documentos náuticos produzidos pela DHN. Adicionalmente, os dados obtidos poderão servir de subsídios para estudos sobre a elevação do nível médio do mar.

No período compreendido entre os dias 31 de outubro e 4 de novembro de 2022, o Navio realizou a comissão de Coleta de dados com Sonar de Varredura Lateral (SVL) Marca: *L3 Communication*, Modelo: *Klein System 3000 MOD 3210*, na área do Arquipélago de Fernando de Noronha – PE. A pesquisa de perigo foi realizada com o fito de identificar a corveta Ipiranga, naufragada em outubro de 1983.

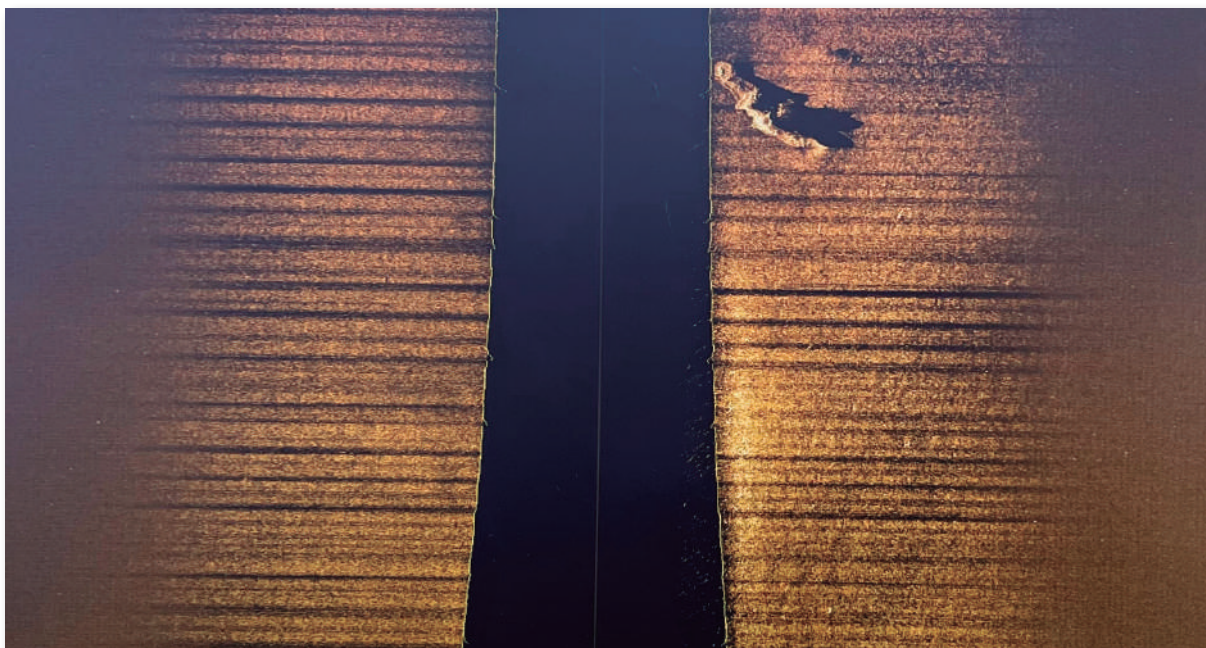


Figura 5 – Imagem da corveta Ipiranga, naufragada em outubro de 1983

SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NáUTICA DO SUL (SSN-5)

NAVIO HIDROGRÁFICO BALIZADOR “COMANDANTE VARELLA”



Figura 1 – Navio Hidrográfico Balizador “Comandante Varella”

Em apoio ao Programa Nacional de Boias (PNBOIA), o NHiB “Comandante Varella” lançou boias, nas proximidades da ilha de Alcatrazes no estado de São Paulo e nas proximidades da Ilha das Araras no estado de Santa Catarina, para efeito de monitoramento e previsão do tempo, assim como os fenômenos meteorológicos e oceanográficos e

dos regimes climáticos observados no Brasil. O PNBOIA é parte fundamental da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO), que tem por objetivo o desenvolvimento de ciência e tecnologia em oceanografia física, modelagem oceânica, oceanografia observacional e oceanografia operacional com assimilação de dados.



Figura 2 – Lançamento Ilha Alcatrazes



Figura 3 – Lançamento Ilha das Araras

SERVIÇO DE SINALIZAÇÃO NáUTICA DO SUL-SUDESTE (SSN-8)

NAVIO BALIZADOR “FAROLEIRO MÁRIO SEIXAS”

Como parte das comemorações atinentes ao aniversário de 150 anos do Farol Conchas, nos períodos de 23 de março a 6 de abril de 2022, e 15 de agosto a 1º de outubro de 2022, o Navio Balizador “Faroleiro Mário Seixas” e o Aviso Balizador “Fomalhaut”, realizaram apoio para a manutenção e reforma estrutural do Farol. Localizado na Ilha do Mel, em Paranaguá-PR, além de contribuir para a segurança da navegação, o Farol Conchas é um importante patrimônio histórico do Paraná e do Brasil, que foi inaugurado em 25 de março de

1872, durante o reinado do Imperador D. Pedro II.

Apesar dos modernos recursos de navegação existentes atualmente, do alto de seus imponentes 18 metros de altura, o guardião de parte do litoral paranaense segue como importante ponto de referência para as embarcações, em especial as de pequeno porte e de pesca. Desde 2019, sua manutenção é realizada pelo Serviço de Sinalização Náutica do Sul-Sudeste (SSN-8), organização militar da Marinha sediada em Paranaguá e subordinada ao Comando do 8º Distrito Naval.



Figura 1 – Navio Balizador “Faroleiro Mário Seixas”



Figura 2 – Aviso Balizador “Fomalhaut”



Figura 3 – Farol das Conchas

VI – ARTIGOS CIENTÍFICOS

ANÁLISE DA TENDÊNCIA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR E FLUXOS DE CALOR NO ATLÂNTICO SUDOESTE ENTRE OS ANOS DE 1959 E 2020.

*Pedro Henrique Ainsworth de Oliveira
e Souza¹*

Fabíola Valéria Barreto Teixeira²

RESUMO

O ambiente subtropical apresenta características interessantes para o estudo de sistemas meteorológicos, em virtude da atuação de fenômenos de diversas escalas e a interação oceano-atmosfera serem significativos para a dinâmica da região. Dentre os diversos elementos relevantes para a análise e previsão do tempo desse ambiente, especialmente no que se refere à modelagem numérica, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) merece destaque. Estabelecer relações entre anomalias de TSM, ciclo de vida de tempestades, regime de precipitação na costa sul-sudeste da América do Sul e fluxos de calor no Atlântico é um assunto de extrema relevância para a compreensão e análise do tempo e do clima na América do Sul e no Oceano Atlântico. Sob esta ótica, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise de séries temporais de TSM e fluxos de calor latente

¹ Oficial do Corpo da Armada, Graduado em Ciências Navais pela Escola Naval. Aperfeiçoado no Curso de Hidrografia para oficiais (CAHO). Atualmente é Oficial do Grupamento de Navios Hidroceanográficos. Email: ainsworth@marinha.mil.br

² Professora Associada-Meteorologia. Graduada na UFRJ, com mestrado em Ciências Atmosféricas pela COPPE e doutorado em Modelagem Computacional no Laboratório Nacional de Computação Científica. Email: fabiola.teixeira@marinha.mil.br



e calor sensível, da base de dados do ECMWF (*European Centre for Medium Range Forecasts*), procurando identificar tendência nas séries temporais e relacionar as variações da TSM com os fluxos de calor. Foi verificada uma tendência positiva nas anomalias de TSM na região da Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e os fluxos de calor latente e calor sensível mostraram associação bastante consistente com essas anomalias positivas de TSM. A tendência de aumento da TSM no período de 1959 a 2020 na região da CBM foi constatada tanto por regressão linear quanto pelo teste estatístico de *Mann-Kendall* com nível de confiança de 95%. Também foi observada tendência de aumento da TSM no Atlântico Sudoeste. Contudo, nesta área, não houve a confirmação estatística.

Palavras-chave: Temperatura da Superfície do Mar. Oceano Atlântico Sudoeste. Tendência da TSM. Fluxos de Calor. Séries Temporais.

ABSTRACT

The subtropical environment presents exciting characteristics for the study of meteorological systems due to the performance of phenomena of different scales and the ocean-atmosphere interaction, which are significant for the region's dynamics. Among the various relevant elements for the analysis and weather forecast of this environment, especially numerical modeling, the Sea Surface Temperature (SST) deserves to be highlighted. Establishing relationships between SST anomalies, storm lifecycle, precipitation regime on the south-southeast

coast of South America and heat fluxes in the Atlantic is a subject of extreme relevance for the understanding and analysis of weather and climate in South America and the Atlantic Ocean. From this perspective, this work aimed to carry out a time series analysis of SST and latent and sensible heat fluxes from the ECMWF (*European Centre for Medium Range Forecasts*) database, trying to identify trend in the time series and to relate the variations of the SST with the heat fluxes. A positive trend was verified in the SST anomalies in the Brazil-Malvinas Confluence (BMC) region. Furthermore, the latent and sensible heat fluxes showed a very consistent association with these positive SST anomalies. The upward trend in SST from 1959 to 2020 in the BMC region was verified using linear regression and the Mann-Kendall statistical test with a 95% confidence level. An increasing trend of SST was also observed in the Southwest Atlantic. However, in this area, there was no statistical confirmation.

Keywords: Sea Surface Temperature. Southwest Atlantic Ocean. SST Trends. Heat Fluxes. Time Series.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente subtropical apresenta características interessantes para o estudo de sistemas meteorológicos, em virtude da atuação de fenômenos de diversas escalas e a interação oceano-atmosfera serem significativos para a dinâmica da região. Dentre os diversos elementos relevantes para a análise e previsão do tempo desse ambiente, especialmente no que se

refere à modelagem numérica, a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) merece destaque (SEBA, 2011).

Diversos estudos, como Diaz *et al.* (1998), Teixeira (2000), Chaves e Nobre (2004), Cataldi *et al.* (2010), Freitas e Souza (2013), Leyba *et al.* (2019) e Pezzi *et al.* (2022), indicam relações importantes entre a TSM e a ocorrência de fenômenos meteorológicos de diversas escalas, como ciclogêneses, eventos de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), fluxos de calor na camada limite planetária, entre outros.

Analisando sistemas meteoceanográficos severos ocorridos na porção sudoeste do Atlântico Sul nas décadas recentes, em especial os fenômenos associados à formação ou deslocamento de ciclones, a influência da TSM e dos fluxos de calor na interface oceano-atmosfera merece atenção (SILVA e REBOITA, 2021 e PEZZI *et al.*, 2022).

De acordo com Dourado e Caltabiano (2005), os fluxos de calor são elementos fundamentais no acoplamento entre o oceano e a atmosfera e, não obstante, parte essencial para a modulação da camada limite atmosférica. Indissociável dos fluxos, encontra-se a TSM, visto sua relação direta com os processos de transferência de calor para a atmosfera e, conseqüentemente, com o balanço de energia dos oceanos (SEBA, 2011). Tendo em vista a relação de retroalimentação entre a TSM e os fluxos de calor na interface atmosfera-oceano, tem-se que os eventos diretamente relacionados a qualquer um desses fatores estarão interligados entre si.

Dal Piva *et al.* (2008), analisando o desenvolvimento de um forte ciclone, verificaram que a ausência dos fluxos de calor latente e de calor sensível na interface ar-mar gera uma camada mais seca e fria próxima à superfície, que diminui a intensificação do ciclone, apontando para a importância daqueles fluxos para a preparação de um ambiente favorável a uma ciclogênese intensa. Além disso, é apontado por Gozzo (2014) e Oliveira (2019) que, apesar de não haver uma relação causal comprovada entre maiores valores de TSM e a ocorrência das tempestades subtropicais, estas interagem com as características do sistema de forma a alterar ou intensificar o mesmo, afetando o deslocamento ou a transição de fase dos sistemas. Entretanto, resultados mais recentes de Marrafon *et al.* (2022) mostraram maior frequência de gênese de ciclones e maior ocorrência de ciclones subtropicais sobre TSM com valores entre 24°C e 26°C.

Em termos dos modos de variabilidade sazonal no Atlântico Sul, uma análise importante é o impacto da variação da posição geográfica da Confluência Brasil-Malvinas (CBM), que representa o encontro da água tropical da corrente do Brasil com a água fria da corrente das Malvinas que oscila entre as latitudes de 30°S (inverno) e aproximadamente 40°S (verão) (PICKARD e EMERY, 1990; CATALDI, 2008). Nos meses de outono, quando há maior frequência de eventos de ciclogênese subtropical, observa-se que a posição da CBM está localizada mais ao sul, nas proximidades da latitude de 40°S, reduzindo o gradiente térmico na superfície na costa sul-sudeste da América do Sul (EVANS e BRAUN, 2012).



Acerca dos eventos ciclogênicos, estudos de Gozzo (2014) com dados da reanálise ERA-Interim (*ECMWF Reanalysis*), apontam que mais de 33% dos ciclones que ocorrem sobre a região próxima aos estados do sul e sudeste do Brasil durante o verão são de natureza híbrida. Essa região compreende a área denominada como RG1 no estudo de Reboita *et al.* (2010), sendo considerada como uma das três mais ciclogênicas do Atlântico Sul. Na figura 1 estão representadas as regiões ciclogênicas identificadas por Reboita *et al.* (2010). Os retângulos identificados na figura como ASW e CBM, representam as áreas de interesse deste trabalho. Estas áreas estão sujeitas a variações sazonais do posicionamento da CBM e, conseqüentemente, às variações de TSM.

Outro estudo abordando a relação entre TSM do Atlântico Sudoeste e ciclones é o de Freitas e Souza (2013). Eles realizaram a análise da influência da anomalia da TSM sobre o deslocamento de tempestades em latitudes médias e altas para um cenário de clima futuro. Seus resultados indicaram que o aumento da TSM naquelas latitudes possui relação com o deslocamento das trajetórias dos ciclones (*Storms Track*) mais para o sul. Ou seja, mudanças nos padrões da TSM em latitudes médias e altas influenciam na redistribuição da atividade ciclônica no cenário climático futuro.

Abordando um pouco mais da associação entre TSM do Oceano Atlântico Sul

e o tempo na costa sul-sudeste da América do Sul, Diaz *et al.* (1998) perceberam importantes associações entre a TSM do Atlântico Sudoeste e o regime de precipitação no sul do Brasil e Uruguai, concluindo que previsões operacionais da TSM são muito relevantes para a avaliação da precipitação nessas regiões. Já Cataldi *et al.* (2010) indicaram que anomalias positivas de TSM na região da CBM acarretaram em redução da precipitação no sul do Brasil e em condições favoráveis para o posicionamento da ZCAS no norte da Região Sudeste do Brasil.

Uma preocupação constante nos estudos de clima é a análise de tendência da TSM, pois o oceano representa um grande reservatório de energia do sistema climático. Gille (2008), usando perfis de temperatura coletados na década de 1990 para o Oceano Antártico, e comparando com perfis coletados desde 1930, mostrou uma tendência de aquecimento oceânico em todas as profundidades até 1000 m, para o período avaliado. A região da Corrente Circumpolar Antártica concentrou os maiores aquecimentos.

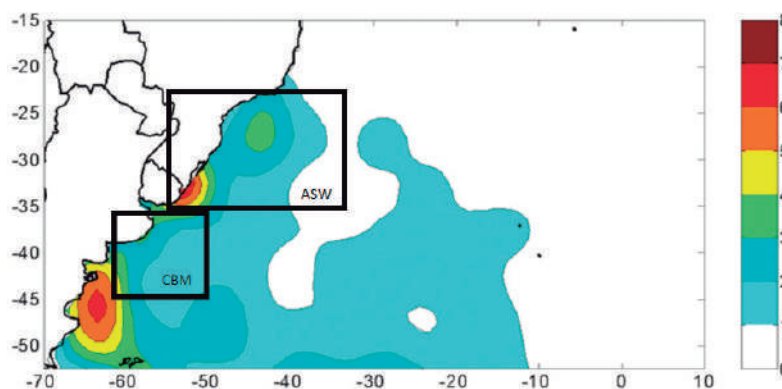


Figura 1 – Regiões com maior densidade anual de ciclogêneses na costa sul-sudeste do Brasil, de acordo com Reboita *et al.* (2010). Os retângulos identificados como ASW e CBM representam as regiões de interesse deste trabalho. Fonte: Adaptado de Reboita *et al.* (2010).

Considerando a região de interesse deste trabalho, o estudo realizado por Lian *et al.* (2018) investigou a existência de tendências na TSM global para o período de 1881 a 2013, usando oito diferentes conjuntos de dados. De acordo com o trabalho, foi verificada a existência de uma consistente tendência de aquecimento no Atlântico Sudoeste. Os autores ressaltaram que para o Pacífico Norte e o Atlântico Norte as tendências não foram tão consistentes.

Relacionando a tendência de aumento da TSM com os fluxos de calor no Atlântico Sul, Leyba *et al.* (2019) identificaram correspondência entre a intensificação dos fluxos de calor do oceano para a atmosfera e o aumento da TSM, no período de 1982 a 2015. Além disso, eles apontaram a região do limite sudoeste da Corrente do Brasil, próximo à costa da América do Sul, com os maiores valores de fluxo, indicando as anomalias de TSM como a principal forçante para o crescimento dos fluxos de calor.

Dada a relevância da interação entre TSM, fluxos de calor e sistemas meteorológicos no Oceano Atlântico Sudoeste, esse trabalho teve por objetivo realizar uma análise de séries temporais de TSM e fluxos de calor latente e de calor sensível, procurando identificar tendências nas séries e relacionar o comportamento dos fluxos de calor com as anomalias de TSM.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1. Dados, regiões de interesse e séries temporais

Os dados utilizados neste trabalho foram da base de dados ERA5 (*ECMWF Reanalysis*), quinta geração de reanálise (HERSBACH *et al.*, 2020 e C3S, 2017). As variáveis utilizadas foram as médias mensais da temperatura da superfície do mar e dos fluxos superficiais de calores latente e sensível, no período de janeiro de 1959 a dezembro de 2020.

Para o processamento e análise dos dados, foram construídas séries temporais das variáveis já citadas. Estas séries temporais foram definidas a partir de médias em duas regiões de interesse no Atlântico Sudoeste. A primeira área foi denominada ASW e compreende as latitudes de 22°S a 35°S e longitudes de 035°W a 055°W. A segunda área foi denominada CBM e compreende as latitudes de 35°S a 45°S e longitudes de 050°W a 060°W. As áreas aqui definidas representam as regiões de interesse deste trabalho, tendo sido selecionadas devido a importância para interação entre o oceano e a atmosfera no oceano Atlântico Sudoeste, sendo muito relevante para estudos de ciclogênese na costa brasileira (REBOITA *et al.*, 2010) e pela presença da Confluência Brasil-Malvinas, encontro de duas correntes com diferenças de temperatura e salinidade, e considerada uma das regiões mais energéticas dos oceanos (CHELTON *et al.*, 1990). Na figura 2 está representado o campo da climatologia anual da TSM obtida a partir dos 62 anos de reanálise. Os retângulos destacados na figura indicam as áreas ASW, retângulo maior, e CBM, retângulo menor.

A área ASW engloba o litoral sul-sudeste do Brasil, com valores médios anuais de TSM variando entre, mais ou



menos, 18°C e 26°C. E a área CBM, mais ao sul, engloba a região associada à variação meridional da CBM.

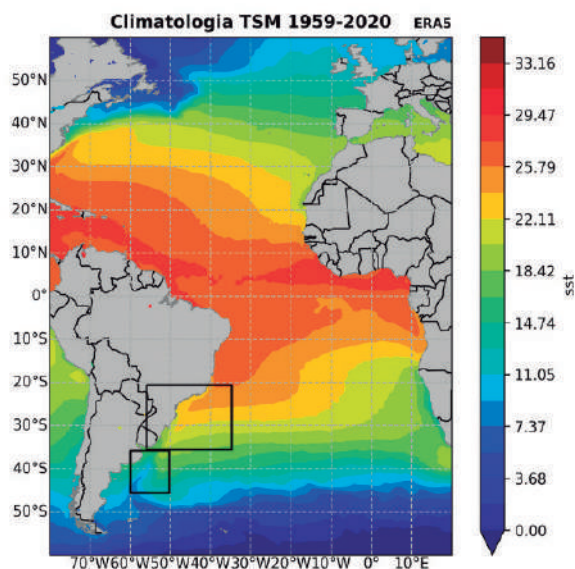


Figura 2 – Climatologia da TSM (1959-2020), em °C, obtida a partir dos dados de reanálises do ECMWF. Os retângulos representados na figura indicam as áreas de interesse deste trabalho, sendo: CBM o retângulo menor e ASW o retângulo maior. Fonte: ERA5/ECMWF

Os dados de médias mensais de 62 anos de TSM foram usados para calcular médias climatológicas mensais, trimestrais e anual. Após o cálculo das médias climatológicas foram obtidas anomalias

mensais, trimestrais e anual da temperatura da superfície do mar.

Também foram construídas as séries temporais das anomalias de TSM e dos fluxos de calor nas áreas ASW e CBM. Visando maior detalhamento das séries temporais e avaliação das tendências, o período total de estudo foi dividido em dois blocos. O primeiro de janeiro de 1959 a dezembro de 1999 e o segundo de janeiro de 2000 a dezembro de 2020.

Nas figuras 3a e 3b são apresentadas as anomalias de TSM obtidas para as séries temporais das médias nas áreas ASW e CBM, respectivamente. Nas figuras estão assinaladas linhas azuis para facilitar a visualização dos valores máximos e mínimos de cada série. Nota-se que, após o ano 2000, aumentou a frequência de anomalias superiores a 3°C na área ASW e superiores a 4°C na área CBM. Também percebe-se que ocorrem menos valores mínimos inferiores a -3°C na área ASW e não há mínimos inferiores a -4°C na área CBM. Essas características motivaram a divisão da análise das séries em dois blocos conforme já mencionado.

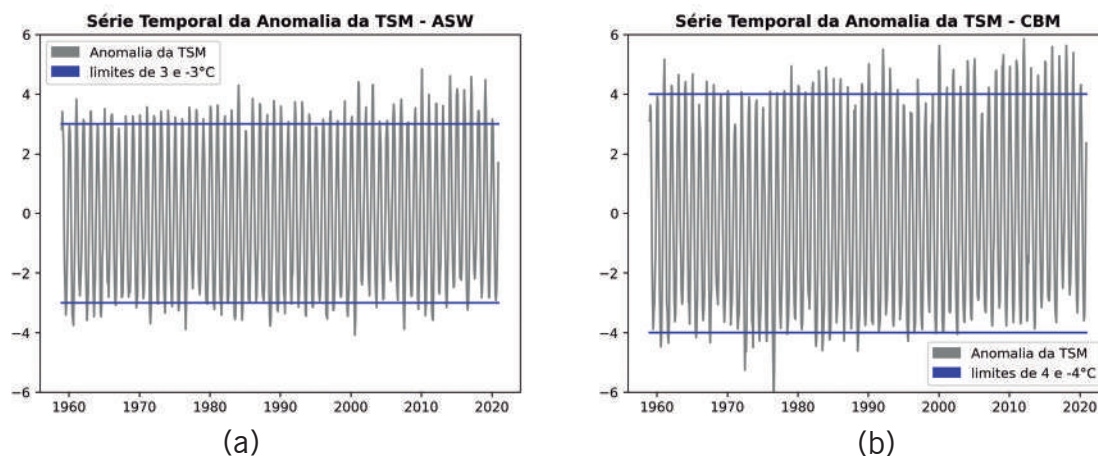


Figura 3 – Séries temporais da média mensal de anomalias da TSM, em °C, para (a) área ASW e (b) área CBM. As linhas azuis servem como referência para identificar os valores máximos e mínimos de anomalia em cada área

Além das médias climatológicas e suas respectivas anomalias, também foram calculadas médias móveis das séries temporais, com uma janela de 36 meses, visando avaliar a variabilidade interanual daquelas séries. As retas de tendência para as séries das médias móveis foram obtidas por regressão linear, como uma análise preliminar dos dados.

Buscando verificar as tendências observadas por regressão linear nas séries temporais da TSM, foi empregado o Teste de *Mann-Kendall* que é um teste não-paramétrico e muito usado para detecção de tendências significativas em séries temporais (LOPES e DA SILVA, 2013).

2.2. Teste de *Mann-Kendall*

De maneira geral, testes para a detecção de tendências em séries temporais podem ser classificados como paramétricos ou não-paramétricos. Os primeiros necessitam que as variáveis sejam independentes e atendam a uma distribuição normal, enquanto os últimos necessitam apenas da relação de independência entre variáveis. Nesse sentido, foi utilizado o teste de *Mann-Kendall* (MANN, 1945; KENDALL, 1975), que é um teste aconselhado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) para avaliação da tendência em séries temporais de dados ambientais (LOPES e DA SILVA, 2013).

A análise aplicada no teste tem como base duas hipóteses: a hipótese nula (H_0) ou hipótese alternativa. A hipótese nula significa que não existe tendência na série de dados, e a hipótese alternativa indica que existe uma tendência

que pode ser positiva (crescimento) ou negativa (decréscimo).

Para uma série temporal de n dados, a equação que define o método é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Sendo n é o número de dados, x_i e x_j representam os valores da série de dados e $\text{sign}(x_j - x_i)$ é dada por:

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Dada uma série temporal extensa, S tenderá para uma distribuição normal com média $E[S]=0$ e variância $\text{Var}[S]$, dada por:

$$\text{Var}[S] = \frac{1}{18} \left\{ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q [t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \right\} \quad (3)$$

Onde t_p é o número de dados com valores iguais em certo grupo; q é o número de grupos contendo valores iguais na série de dados em um grupo p .

A estatística do teste de *Mann-Kendall* é baseada no valor da variável Z_{MK} , calculado conforme a equação a seguir:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}[S]}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}[S]}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Quando Z_{MK} apresenta valores positivos, a tendência é de crescimento, enquanto resultados negativos indicam decréscimo. As tendências são obtidas e verificadas para um nível de significância p .



O não atendimento deste, implica na hipótese nula (H_0).

No presente trabalho, foram empregadas rotinas da biblioteca *pymannkendall* disponível para linguagem *Python*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Temperatura da Superfície do Mar: climatologia e séries temporais

A climatologia de 62 anos mostrou a movimentação meridional da Confluência Brasil-Malvinas ao longo do ano (figuras não mostradas), e com posição média em torno da latitude de 40°S.

A análise das médias mensais, trimestrais e anual das anomalias da TSM mostraram valores diferentes de zero principalmente no setor sudoeste do Oceano Atlântico, junto a costa leste da América do Sul. O passo seguinte, foi separar os conjuntos das médias em dois períodos de dados, conforme descrito na seção anterior. O primeiro bloco iniciando em janeiro de 1959, e terminando em dezembro de 1999. O segundo intervalo

compreendendo de janeiro de 2000 a dezembro de 2020. A distribuição horizontal das anomalias médias mostrou ano após ano um crescimento no sul do oceano Atlântico. As figuras 4a e 4b representam as médias das anomalias anuais para os dois blocos de dados.

Analisando as anomalias da Figura 4a, nota-se que o primeiro período (1959-1999) apresenta a maioria dos valores médios próximos de zero, com alguns valores sensivelmente negativos no Atlântico Sudoeste, na área denominada de CBM (retângulo menor). Diferente desse comportamento, no bloco de dados para o período entre 2000 e 2020 (Figura 4b), percebe-se anomalias positivas nas duas áreas de interesse destacadas pelos retângulos, com valores em torno de +0,5°C na ASW e superando +1,0°C na CBM. Vale citar que valores positivos de anomalia média se estendem por todo o sul do Atlântico Sul, na faixa entre as latitudes de 40°S e 50°S. Estudos anteriores, tais como Gille (2008), Lian *et al.* (2018) e Leyba *et al.* (2019) detectaram anomalias positivas de TSM para a mesma região.

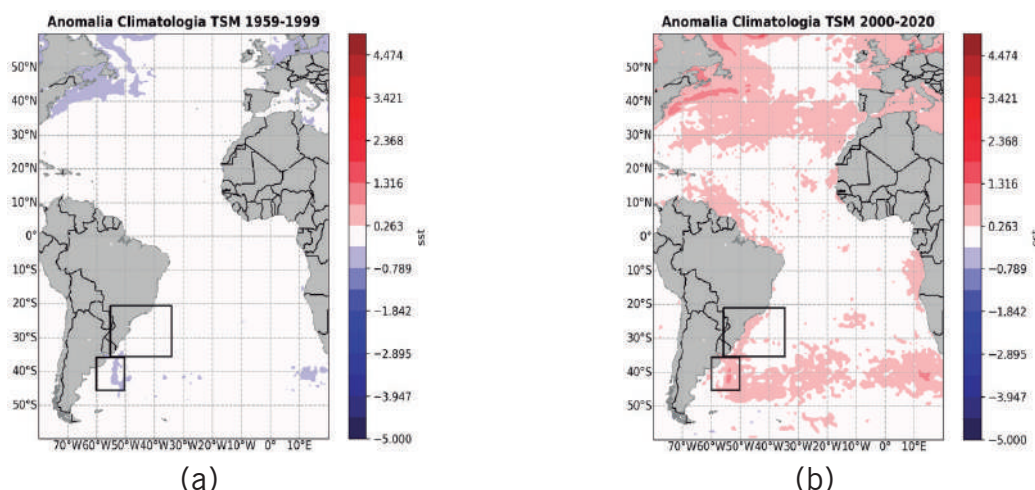


Figura 4 – Média anual das anomalias de TSM, em °C, para os períodos: (a) 1959-1999 e (b) 2000-2020. Os retângulos indicam as regiões denominadas neste estudo de ASW (retângulo maior) e CBM (retângulo menor)

Os maiores valores de anomalias positivas da TSM no Atlântico Sudoeste foram detectados na região da Confluência Brasil-Malvinas. Como a posição da CBM apresenta uma variação sazonal, uma hipótese para ocorrência de anomalias positivas de TSM na costa leste da América do Sul é um possível deslocamento da região da confluência, fazendo com que águas superficiais mais quentes tenham sofrido mudança na posição climatológica.

Foi realizada uma verificação preliminar do possível deslocamento da CBM a partir do cálculo do gradiente meridional da TSM média mensal. As figuras 5a, 5b e 5c representam, respectivamente, a média de 62 anos, a média de 1959-1999 e a média de 2000-2020, do gradiente meridional da TSM. Pode-se notar que não há variação significativa do posicionamento das feições observadas na costa leste da América do Sul. O gradiente na região da CBM varia entre os valores de $-1^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$ a $3^{\circ}\text{C}/100\text{ km}$, tanto para a média de 62 anos quanto para as médias dos períodos antes e após o ano 2000, apresentando apenas uma ligeira intensificação do gradiente na região da CBM, no período após o ano 2000.

Seguindo com as análises, na Figura 6 estão representadas as médias móveis de 36 meses para as séries temporais da anomalia da TSM nas áreas de estudo ASW e CBM. Na Figura 6a estão reproduzidos os dados da área ASW, onde observa-se uma espécie de degrau na série da média móvel a partir do ano 2000. Este incremento está de acordo com a discussão apresentada para a série original da anomalia de TSM apresentada na seção 2.1. Nota-se ainda que os valores das anomalias de TSM são

positivos, mas muito próximos de zero entre 2005 e 2012. Já na área CBM (Figura 6b), percebe-se que o aumento da média móvel das anomalias de TSM após o ano 2000 é mais nítido e consolidado, sendo que depois de 2015, essas anomalias permanecem acima de $+0,5^{\circ}\text{C}$.

Devido ao crescimento observado nas médias móveis das anomalias de TSM, a investigação sobre o comportamento da série de dados prosseguiu com o cálculo das retas de tendência usando regressão linear. Estas retas estão desenhadas na Figura 6 em diferentes cores para cada intervalo de tempo.

Considerando a série completa com 62 anos de dados, percebe-se uma leve tendência de aumento das anomalias (reta na cor preta na Figura 6). Dividindo o período total em dois intervalos de dados, 1959-1999 e 2000-2020, percebe-se que na área CBM, a reta obtida por regressão linear (linha laranja na Figura 6) tem uma evidente inclinação positiva no período posterior ao ano 2000. Na área ASW, a tendência estimada por regressão linear separadamente para os dois intervalos de dados e para o período de 62 anos não é conclusiva pois os coeficientes angulares tem sinais opostos. Ou seja, a inclinação das retas antes e após 2000 tem coeficiente angular negativo enquanto a série completa tem coeficiente angular positivo. Apesar de aparentemente contraditório, este resultado é explicado pela grande variação positiva na anomalia de TSM entre 1998 e 2002. Percebe-se que entre 1959 e 1999 as anomalias são quase todas negativas. Mas entre 2000 e 2002, a anomalia de TSM chega a $+0,5^{\circ}\text{C}$, voltando a cair até o ano 2012, sem, contudo, atingir valores negativos.

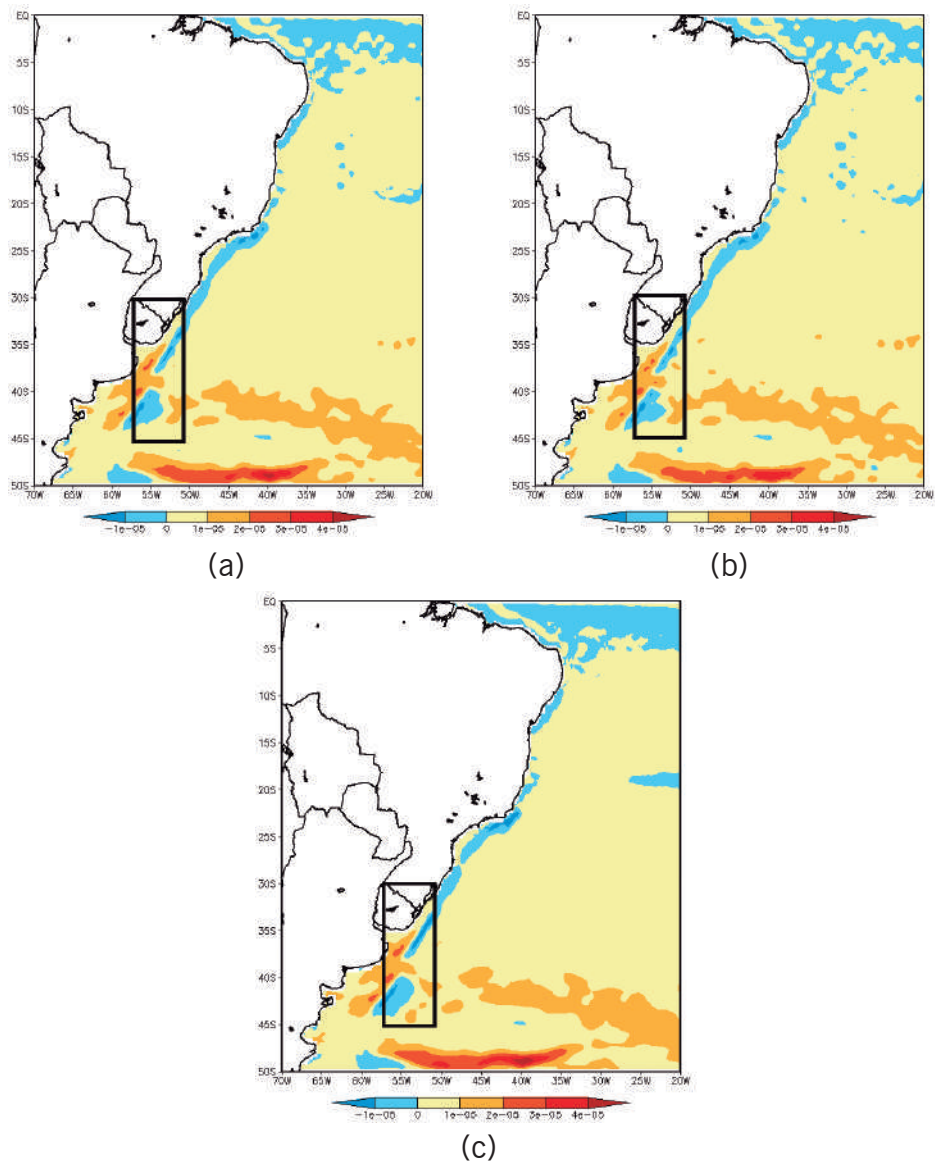


Figura 5 – Gradiente meridional da TSM, em °C/km, (a) média de 62 anos, (b) média de 1959 a 1999 e (c) média de 2000 a 2020. O retângulo indica o deslocamento meridional típico da CBM ao longo do ano

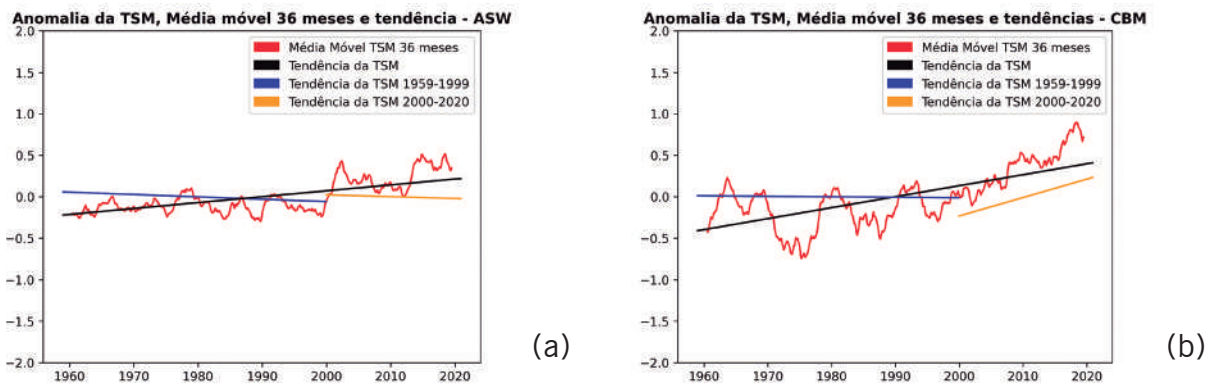


Figura 6 – Série temporal da média móvel de 36 meses da anomalia de TSM, em °C, nas áreas (a) ASW e (b) CBM, com as retas de tendência obtidas por regressão linear para 62 anos (linha preta), 1959-1999 (linha azul) e 2000-2020 (linha laranja)

3.2. Teste de *Mann-Kendall* aplicado às séries temporais da temperatura da superfície do mar

De maneira geral, usando regressão linear, observou-se uma tendência de aumento da TSM na área da CBM tanto para a série histórica (62 anos) quanto para o período pós ano 2000. A taxa de aquecimento da série histórica é $+0,13^{\circ}\text{C}/\text{dec}$ e quase dobra nas últimas duas décadas, passando a $+0,24^{\circ}\text{C}/\text{dec}$. Entretanto, na área ASW essa tendência de crescimento da temperatura não foi conclusiva. A série histórica mostra uma leve tendência de aquecimento, correspondendo a uma taxa de $+0,071^{\circ}\text{C}/\text{dec}$. Mas nos períodos pré e pós ano 2000, a tendência mostra um sensível resfriamento com taxas de $-0,02^{\circ}\text{C}/\text{dec}$ e $-0,04^{\circ}\text{C}/\text{dec}$, respectivamente. Conforme discutido na seção anterior, entre 1999 e 2002, há um intenso aquecimento que não foi assimilado pela regressão linear dos períodos isolados, mas que prevalece na série completa. Na Tabela 1 é apresentado um resumo dos resultados da regressão linear.

Após os resultados da regressão linear para as séries de TSM, o teste de *Mann-Kendall* foi aplicado a fim de verificar estatisticamente a hipótese de existência de alguma tendência nos dados. Seguindo a metodologia usada na regressão, a verificação foi realizada para a série histórica e para o intervalo de 2000 a 2020.

De acordo com a descrição do método de *Mann-Kendall* na seção 2.2, a ideia é verificar a presença de alguma tendência positiva ou negativa na série, para um certo nível de significância. Os parâmetros S e ZMK do teste foram calculados e um resumo dos resultados é mostrado na Tabela 2. O nível de significância adotado para considerar a existência de tendência foi $p = 0,05$. Dessa forma, quando o valor de p for igual ou inferior à 0,05 a hipótese nula (ausência de tendência) é descartada e a hipótese alternativa (existência de tendência) é confirmada. O sinal da tendência é determinado pelo valor de ZMK, isto é, tendência de aumento para valores positivos e tendência de redução para valores negativos.

Tabela 1 – Coeficiente angular e taxa de variação resultantes da regressão linear das séries temporais das áreas ASW e CBM. A série histórica é composta pelos 62 anos de dados (1959-2020), a série pré 2000 é composta por dados de 1959 a 1999 e a série pós 2000 é composta por dados de 2000 a 2020. As taxas positivas estão hachuradas

		Coeficiente Angular	Taxa de Variação
Série Histórica	ASW	$+5,47 \times 10^{-4}$	$+0,07^{\circ}\text{C}/\text{dec}$
	CBM	$+1,08 \times 10^{-3}$	$+0,13^{\circ}\text{C}/\text{dec}$
Pré 2000	ASW	$-1,51 \times 10^{-4}$	$-0,02^{\circ}\text{C}/\text{dec}$
	CBM	$-4,96 \times 10^{-4}$	$-0,06^{\circ}\text{C}/\text{dec}$
Pós 2000	ASW	$-3,68 \times 10^{-4}$	$-0,04^{\circ}\text{C}/\text{dec}$
	CBM	$+2,02 \times 10^{-3}$	$+0,24^{\circ}\text{C}/\text{dec}$



Tabela 2 – Parâmetros obtidos no teste de *Mann-Kendall* para as séries temporais das anomalias da TSM nas áreas ASW e CBM. A série histórica é composta pelos 62 anos de dados (1959-2020) e a série pós 2000 é composta por dados de 2000 a 2020. A série com tendência de aumento confirmada estatisticamente está hachurada

		S	Z_{MK}	p	Tendência
Série Histórica	ASW	+11429,0	+1,688	0,091	-
	CBM	+16618,0	+2,454	0,014	Aumento
Pós 2000	ASW	-254,0	-0,189	0,849	-
	CBM	+1206,0	+0,901	0,367	-

De acordo com os parâmetros S e Z_{MK} calculados no teste de *Mann-Kendall*, as três séries temporais de TSM com coeficientes angulares positivos (Tabela 1) apresentaram valores compatíveis com tendência de crescimento. Contudo, apenas a série histórica para a área da CBM teve a tendência validada estatisticamente para um nível de confiança de 0,05. Para os outros conjuntos de dados, a hipótese nula (ausência de tendência) não pode ser descartada.

Um aspecto que deve ser considerado sobre a não validação estatística das séries de dados pós 2000 e da série histórica para a área ASW, é que ciclos sazonais e interanuais presentes nos dados pode ter ocultado sinais associados a possíveis tendências. Portanto, novas verificações podem ser realizadas considerando os dados daquelas séries agrupados por estação do ano.

3.3. Fluxos de calor latente e calor sensível do oceano para a atmosfera

Os fluxos de calor sensível e latente dependem do aquecimento e evaporação da superfície. Portanto, se ocorre mais aquecimento da superfície do mar, haverá mais fluxo de calor sensível e latente. O estudo de Leyba *et al.* (2019) discutiu justamente a tendência de crescimento de fluxos de calor sobre o oceano Atlântico Sudoeste e o aumento da temperatura da superfície do mar. A seguir, as séries temporais dos fluxos de calor serão discutidas em busca de aspectos que confirmem a relação entre TSM e fluxos de calor. Na análise dos fluxos, valores negativos indicam transferência de calor da superfície (oceano) para a atmosfera, ou seja, a perda de calor do oceano. Enquanto que valores positivos dos fluxos indicam o sentido inverso para o transporte de calor.

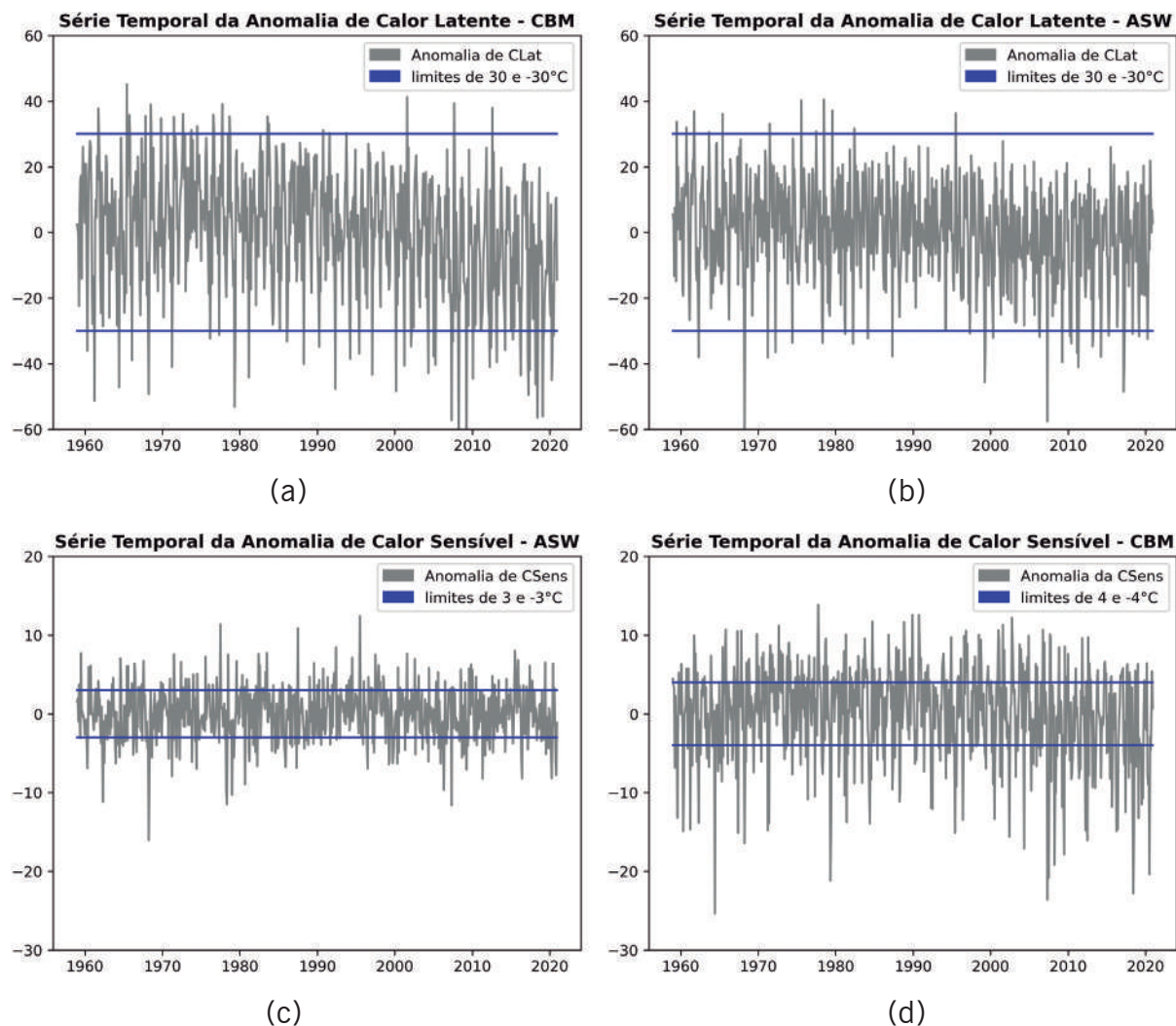


Figura 7 – Séries temporais da média mensal de anomalias do fluxo de calor latente, em W/m^2 , para (a) área ASW e (b) área CBM, e fluxo de calor sensível, em W/m^2 , (c) área ASW e (d) área CBM. As linhas azuis servem como referência para identificar os valores máximos e mínimos de anomalia em cada área

Na Figura 7 são apresentadas as figuras dos fluxos de calor latente e calor sensível para as áreas ASW e CBM. Um aspecto que merece atenção, é que os referidos fluxos na área CBM (Figura 7b e 7d) tem maiores amplitudes que os fluxos da área ASW. Outro ponto interessante é que, após o ano 2000, a área CBM tem mais ocorrências de fluxo de calor latente inferior à $-30W/m^2$ e fluxo de calor sensível inferior à $-4W/m^2$. Esta situação está de acordo com o observado para a anomalia média anual da TSM mostradas na figura 4b, onde são

observados valores positivos na costa sudeste da América do Sul, sendo os maiores valores posicionados na região de atuação da Confluência Brasil-Malvinas.

Para auxiliar a avaliação da variação dos fluxos de calor ao longo da série de dados e suavizar os efeitos sazonais, foi calculada a média móvel destas variáveis, que estão representadas na figura 8. Além da média móvel, na mesma figura, estão representadas as retas de regressão linear para a série histórica e para as séries antes e depois do ano 2000.

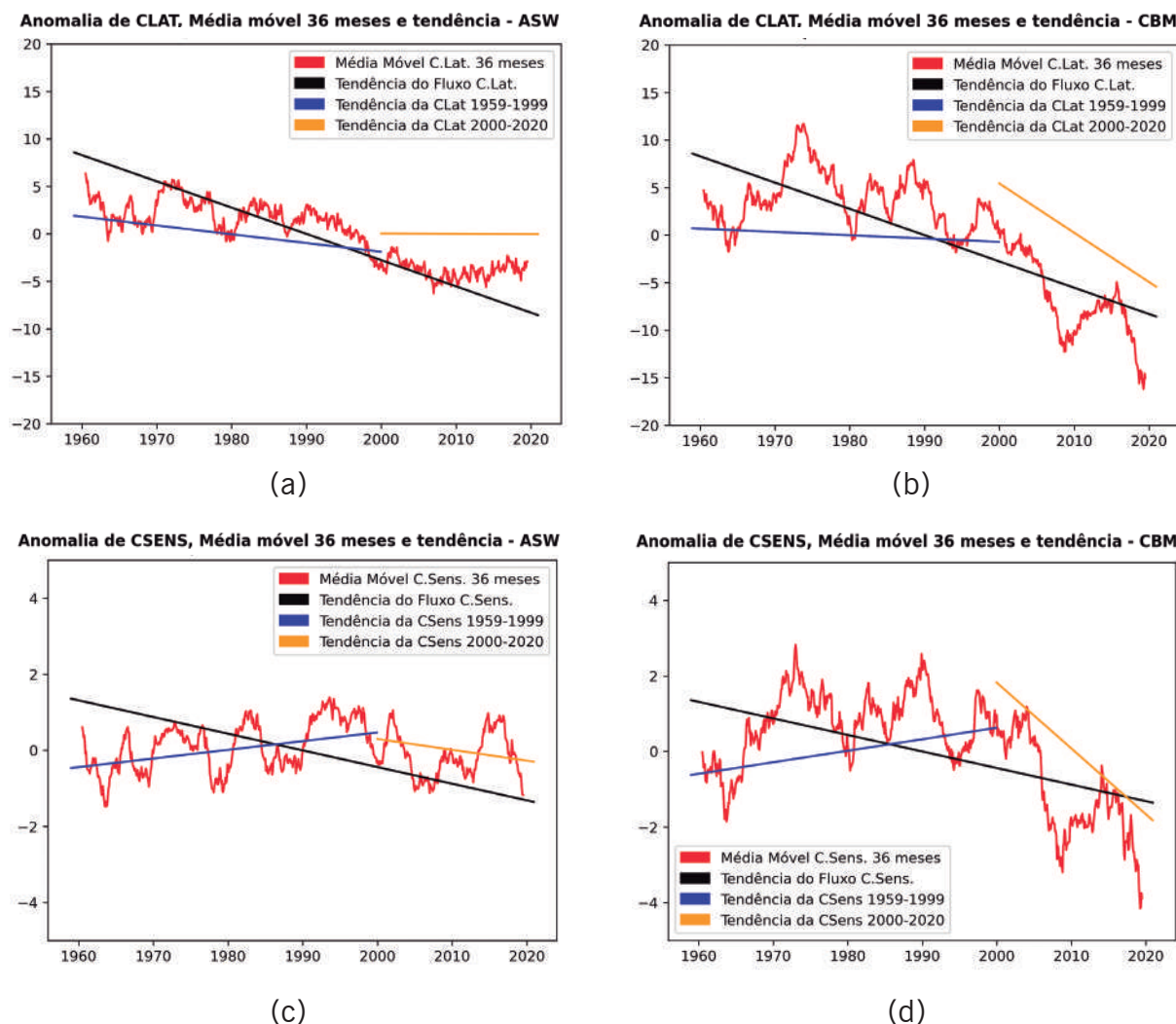


Figura 8 – Série temporal da média móvel de 36 meses da anomalia dos fluxos de calor latente, em W/m^2 , nas áreas (a) ASW e (b) CBM, e fluxos de calor sensível, em W/m^2 , (c) ASW e (d) CBM, com as retas de tendência obtidas por regressão linear para 62 anos (linha preta), 1959-1999 (linha azul) e 2000-2020 (linha laranja)

Observando as séries das médias móveis do fluxo de calor é ainda mais evidente a diferença de amplitude entre os fluxos das áreas ASW e CBM. Lembrando que fluxo negativo implica em fluxo no sentido do oceano para a atmosfera, é interessante notar que as séries de calor latente apresentam uma nítida redução depois do ano 2000, coincidindo com o crescimento das anomalias positivas de TSM discutidas anteriormente. No caso do fluxo de calor sensível, a redução é

mais evidente na série da área CBM e a partir do ano 2005. Na área ASW, a redução é mais discreta que na CBM, e ocorre principalmente entre o ano 2000 e o ano 2010, e após 2018.

A tendência de fluxo de calor do oceano para a atmosfera é mais explícita observando a reta de regressão linear da série histórica para as duas regiões de interesse (reta na cor preta nas figuras 8 a-d). A inclinação das retas da série histórica é negativa em todas as situações.

No caso da tendência dos fluxos depois do ano 2000, na área CBM os coeficientes são negativos tanto para o fluxo de calor latente quanto para o fluxo de calor sensível. Também percebe-se que os valores absolutos de fluxo são bem maiores para a região da CBM que para a região ASW. Ainda na área ASW, observa-se que a reta de tendência de aumento do fluxo de calor sensível do oceano para atmosfera após o ano 2000 tem inclinação semelhante à da reta da série histórica. Já para o fluxo de calor latente, o crescimento na área ASW ocorre ao longo da década de 90, mantendo uma tendência de estabilidade após o ano 2000.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estabelecer relações entre anomalias de TSM, ciclo de vida de tempestades, regime de precipitação na costa sul-sudeste da América do Sul e fluxos de calor no Atlântico é um assunto de extrema relevância para a compreensão e análise do tempo e do clima na América do Sul e no Oceano Atlântico Sul. Sob esta ótica, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise de séries temporais de TSM e fluxos de calor latente e calor sensível, da base de dados do ECMWF, procurando identificar tendências nas séries temporais e relacionar as variações da TSM com as tendências dos fluxos de calor em duas áreas no Atlântico, denominadas neste estudo de ASW e CBM.

Para avaliar a existência de tendência nas séries de TSM foi feita uma regressão linear dos dados e também foi aplicado o teste estatístico de *Mann-Kendall*.

As análises foram realizadas para a série histórica (62 anos de dados), e para os períodos antes do ano 2000 (1959-1999) e após o ano 2000 (2000-2020).

Analisando em primeiro lugar a distribuição espacial da anomalia média anual da TSM nos períodos antes e depois do ano 2000, percebeu-se uma anomalia positiva significativa no Atlântico Sudoeste na média pós ano 2000, sendo os maiores valores localizados na área CBM. Para avaliar um possível deslocamento da região da Confluência Brasil-Malvinas, que faria com que as águas superficiais mais quentes sofressem mudança na posição climatológica, foi calculado o gradiente meridional da TSM média mensal, e não foi verificada variação significativa do posicionamento das feições observadas na costa leste da América do Sul. Os valores mais significativos do gradiente meridional ocorrem na região da CBM, com uma ligeira intensificação do gradiente no período após o ano 2000.

Seguindo com as avaliações, as séries temporais das médias móveis da anomalia de TSM para as áreas ASW e CBM apresentaram um comportamento semelhante em torno do ano 2000, quando esta variável parece sofrer um incremento. Esta tendência foi avaliada num primeiro momento utilizando a reta de regressão linear das séries. No caso das séries históricas, as retas para as duas regiões de estudo mostram inclinação positiva (tendência de aumento). Já avaliando os períodos antes e depois do ano 2000, essa tendência mostra coeficiente nitidamente positivo apenas para a área CBM e após o ano 2000.

O teste de *Mann-Kendall* foi aplicado para verificação estatística de tendência



nas séries temporais de TSM, com significância de 0,05. Apenas na série histórica da área CBM foi confirmada a hipótese de tendência de aumento. No caso da série após o ano 2000 para esta mesma área, não foi possível confirmar a tendência de crescimento da anomalia, mesmo com o coeficiente de regressão linear bastante significativo. Uma explicação para este fato, pode ser a interferência de ciclos sazonais e interanuais nos dados, ocultando sinais associados a possíveis tendências. Reavaliar as tendências das séries por trimestres, pode reduzir este efeito.

Conforme esperado, os fluxos de calor latente e calor sensível mostraram associação bastante consistente com as anomalias positivas de TSM. Observando as séries temporais dos fluxos de calor latente e calor sensível nas áreas ASW e CBM, a segunda apresentou maiores fluxos do oceano para a atmosfera do que a primeira. A CBM foi a área que mostrou

maior anomalia positiva de TSM especialmente após o ano 2000. Outro aspecto interessante, é que nessa região observou-se os maiores gradientes meridionais de TSM, que também influenciam as trocas de calor entre oceano e atmosfera. Outra boa correspondência entre a variação da TSM e os fluxos de calor pode ser notada com a análise da regressão linear, onde as séries históricas dos fluxos de calor latente e calor sensível mostram uma tendência de intensificação do fluxo do oceano para a atmosfera, como resposta às anomalias positivas da TSM.

Como principal resultado deste trabalho, fica a constatação da tendência positiva na série temporal de 62 anos da anomalia de TSM para a área CBM. Com toda certeza, este resultado não é definitivo, mas contribui com a discussão sobre a variabilidade da TSM no Atlântico Sudoeste, e aponta para a necessidade de melhorar a compreensão dos mecanismos de interação entre o oceano e a atmosfera.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CATALDI, M. Estudo Numérico da Influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul extratropical e do pacífico equatorial no regime hidrometeorológico das regiões sul e sudeste do Brasil. 2008. p. 225. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

CATALDI, M.; ASSAD, L.P. de F.; JUNIOR, A. R. T.; ALVES, J. L. D.. *et al.* Estudo da influência das anomalias da TSM do Atlântico Sul extratropical na região da Confluência Brasil-Malvinas no regime hidrometeorológico de verão do Sul e Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 4, p. 513–524, dez. 2010.



CHAVES, R. R.; NOBRE, P. *Interactions between sea surface temperature over the South Atlantic Ocean and the South Atlantic Convergence Zone. Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 3, p. L03204, 2004.

CHELTON, D.B.; SCHLAX, M.G.; WITTER, D.L.; RICHAMAN, J.G.. *Geosat Altimeter Observations of the Surface Circulation of the Southern Ocean. Journal of Geophysical Research*, v. 95, n. C10, p. 17877-17903, out. 1990.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). ERA5: *fifth generation of ECMWF ATMOSPHERIC REANALYSES OF THE GLOBAL CLIMATE*. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). 2017.

DAL PIVA, E.; MOSCATI, M. C. DE L.; GAN, M. A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na Costa Leste da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, V. 23, N. 4, P. 450–476, DEZ. 2008.

DIAZ, A. F., STUDZINSKI, C. D., MECHOSO, C. R. *Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and southern Brazil and sea surface temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. Journal of Climate*, v. 11, N. 2, P. 251–271, FEV. 1998.

DOURADO, M. S.; CALTABIANO, A. C. V. Novos conceitos na definição da temperatura da superfície do mar. In: SOUZA, R. B. *Oceanografia por satélites*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. p. 136-147.

EVANS, J. L.; BRAUN, A. A *Climatology of Subtropical Cyclones in the South Atlantic. Journal of Climate*, v. 25, n. 21, p. 7328–7340, nov. 2012.

FREITAS, R. A. P. DE; SOUZA, R. B. DE. Influência das anomalias da temperatura da superfície do mar em regiões de latitudes médias e altas na trajetória preferencial dos ciclones extratropicais sob condições climáticas de aquecimento global. *Ciência e Natura*, v. 0, n. 0, p. 449–451, 13 nov. 2013.

GILLE, S. T. *Decadal-scale temperature trends in the Southern Hemisphere ocean. Journal of Climate*. v. 21, n. 18, p. 4749–4765, set. 2008.

GOZZO, L. F. *Ciclones Subtropicais sobre o sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e fontes de umidade*. p. 153. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2014.



HERSBACH, H., BELL, B., BERRISFORD, P., HIRAHARA, S., HORÁNYI, A., MUÑOZ-SABATER, J., NICOLAS, J., PEUBEY, C., RADU, R., SCHEPERS, D., SIMMONS, A., SOCI, C., ABDALLA, S., ABELLAN, X., BALSAMO, G., BECHTOLD, P., BIAVATI, G., BIDLOT, J., BONAVITA, M., DE CHIARA, G., DAHLGREN, P., DEE, D., DIAMANTAKIS, M., DRAGANI, R., FLEMMING, J., FORBES, R., FUENTES, M., GEER, A., HAIMBERGER, L., HEALY, S., HOGAN, R.J., HÓLM, E., JANISKOVÁ, M., KEELEY, S., LALOYLAUX, P., LOPEZ, P., LUPU, C., RADNOTI, G., DE ROSNAY, P., ROZUM, I., VAMBORG, F., VILAUME, S., THÉPAUT, J.N. THE ERA5 GLOBAL REANALYSIS. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. V. 146, N. 730, P. 1999-2049, 2020.

KENDALL, M. G. *Rank correlation measures*. Charles Griffin: London, U.K, p.220, 1975.

LOPES, J. R. F; DA SILVA, D. F. Aplicação do teste de *mann-kendall* para análise de tendência pluviométrica no Estado do Ceará. *Revista de Geografia (UFPE)*, v. 30, N. 3, 2013.

LEYBA, I. M.; SOLMAN, S. A.; SARACENO, M. *Trends in sea surface temperature and air-sea heat fluxes over the South Atlantic Ocean*. *Climate Dynamics*, v. 53, n. 7–8, p. 4141–4153, out. 2019.

LIAN, T., SHEN, Z., YING, J., TANG, Y., LI, J., LING, Z. *Investigating the uncertainty in global SST trends due to internal variations using an improved trend estimator*. *Journal of Geophysical Research: Oceans*. v. 123, p. 1877– 1895, 2018.

MANN, H. B. *Econometrica*. *The econometric society*, v.13, n.3, p.245-259, 1945.

MARRAFON, V. H., REBOITA, M. S., ROCHA, R. P. da, JESUS, E. M. de. Classificação dos tipos de ciclones sobre o oceano Atlântico Sul em projeções com o RegCM4 e MCGs. *Revista Brasileira de Climatologia*. v. 30, jan-jun 2022.

OLIVEIRA, D. M. DE. Análise Sinótica de Seis Ciclones Subtropicais no Sudoeste do Oceano Atlântico Sul e experimentos numéricos de sensibilidade. 2019. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG. 2019.

PEZZI, L. P. *et al*. *The effect of Oceanic South Atlantic Convergence Zone episodes on regional SST anomalies: the roles of heat fluxes and upper-ocean dynamics*. *Climate Dynamics*, 16 mar. 2022.

PICKARD, G. L.; EMERY, W. J. *Introductory Descriptive Physical Oceanography*. 5. ed. Oxford: Pergamon Press, 1990. 336 p.



REBOITA, M. S. *et al.* *South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3)*. *Climate Dynamics*, v. 35, n. 7–8, p. 1331–1347, dez. 2010.

RISARO, D. B.; CHIDICHIMO, M. P.; PIOLA, A. R. *Interannual Variability and Trends of Sea Surface Temperature Around Southern South America*. *Frontiers in Marine Science*, v. 9, p. 829144, 4 mar. 2022.

SEBA, Walid Maia Pinto Silva e. Impacto da TSM de alta resolução em simulações de previsão numérica do tempo na região da confluência Brasil-Malvinas. 2011. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2011. XXXIV + 145 p.

SILVA, B. A.; REBOITA, M. S. Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 44, 19 mar. 2021.

TEIXEIRA, Fabiola Valéria Barreto. Estudo da Zona de Convergência do Atlântico Sul com Simulações Estendidas do Modelo Regional Atmosférico RAMS. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. Rio de Janeiro. 2000.





ANÁLISE DOS PARÂMETROS DESCRITIVOS DE ONDA COLETADOS POR ONDÓGRAFO DE PRODUÇÃO NACIONAL

Pedro Octavio Foloni Sousa^{1*}

*Elias de Castro Nadaf*²

*Leonardo Ferraz*³

*Luiz Alexandre A. Guerra*⁴

*André L. T. Mendes*⁵

RESUMO

O presente estudo apresenta uma análise preliminar dos parâmetros descritivos de onda obtidos por dois ondógrafos diferentes: o *MessenOcean* UCMO-1, de fabricação nacional, e o *AXYS Next Wave II*. Ambos os sensores foram instalados no centro de gravidade de uma boia *AXYS 3M* e submetidos a testes de campo, na Baía de Santos, no período entre dezembro de 2022 e abril de 2023. Com o objetivo de avaliar a correlação entre as medições dos sensores, foram plotadas as séries temporais dos parâmetros de cada sensor, bem como seus gráficos de dispersão, e calculadas as métricas estatísticas RMSE, MAE e correlação de *Pearson*. Os resultados mostraram uma correlação forte nas medições da altura de onda, e indicaram a necessidade de realizar esforços analíticos adicionais para descrever as diferenças observadas nos parâmetros direção média de ondas e período de pico.

¹ Oceanógrafo pela USP, M. Sc. Em Dinâmica Costeira pela USP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: p.foloni@gmail.com

² Oficial do Corpo da Armada, M. Sc. em Meteorologia e Oceanografia Física pela *Naval Postgraduate School*, e Encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do CHM. Email: nadaf@marinha.mil.br

³ Engenheiro Mecânico pela UNIP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: leonardo-fg1980@gmail.com

⁴ Oficial do Quadro Técnico da Reserva Não Remunerada, Oceanógrafo, D.Sc., e Profissional NS Master PETROBRAS/CENPES. Email: laguerra@petrobras.com.br

⁵ Oceanógrafo, D.Sc., e Profissional NS Sênior PETROBRAS/CENPES. Email: andreltm@petrobras.com.br

Palavras-chave: medição de ondas, ondógrafo, análise comparativa, Baía de Santos.

ABSTRACT:

The present study provides a preliminary analysis of the data obtained by two different wave sensors: the Messen-Ocean UCMO-1, made in Brazil, and the AXYS Next Wave II. Both sensors were installed at the center of gravity of an AXYS 3M buoy and subjected to field tests between December 2022 and April 2023. To evaluate the correlation between the sensor measurements, the time series of parameters for each sensor were plotted, along with their scatter plots. Statistical such as RMSE, MAE and Pearson correlation were calculated. The results show a strong correlation in Wave Height, and indicated the need for additional analytical efforts to describe the observed differences in the mean wave direction and peak period parameters.

Keywords: wave measurements, wave sensor, comparative analysis, Santos Basin

1. INTRODUÇÃO

A medição das ondas do mar é fundamental para diversas aplicações, como previsão de tempo, monitoramento de processos costeiros e projetos de engenharia costeira, entre outras. Atualmente, existe uma ampla variedade de sensores com esse propósito. Esses sensores, comumente chamados de ondógrafos, apresentam diferentes métodos de aquisição,

princípios de funcionamento, precisão e acurácia. Um dos métodos mais aceitos consiste na utilização de acelerômetros combinados com giroscópios e bússolas. Sistemas desse tipo são capazes de reproduzir os principais descritores de onda. No entanto, as incertezas na medição aumentam de acordo com a qualidade desses componentes e o algoritmo de processamento por trás do *hardware*.

De maneira geral, há uma grande carência de informações de ondas na costa brasileira. Dentre os principais entraves, está o alto custo associado à compra e importação de sensores de ondas. Diante dessa problemática, é estratégico promover o desenvolvimento de tecnologias nacionais, visando à redução de custos e ampliação da capacidade de monitoramento meteoceanográfico em Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB).

Nesse contexto, o projeto “Pesquisa e Desenvolvimento para Consolidação da Tecnologia da Boia Meteoceanográfica Nacional” surge como uma iniciativa relevante, visando aprimorar o conhecimento sobre o clima de ondas na costa brasileira. Resultado de uma parceria entre o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e a Petrobras, o projeto é parte integrante da Rede de Modelagem e Observação Oceanográfica (REMO) e tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de sistemas de medição de ondas, bem como fornecer informações em apoio às atividades de meteorologia e oceanografia do Brasil, visando a segurança da navegação, salvaguarda da vida humana no mar e o aumento da eficiência das operações *offshore*, em conjunto com o Programa Nacional de Boias (PNBOIA).



Dentro do escopo deste projeto, encontra-se a validação de um sistema ondógrafo nacional, o *MessenOcean* UCMO-1, referido neste documento como SBG. Esse sistema foi desenvolvido por meio da integração de um sensor inercial de movimento do tipo AHRS (sensor referenciado por atitude e direção), que utiliza tecnologia MEMS (sistemas microeletromecânicos). O presente estudo compara os resultados obtidos por esse ondógrafo com os dados do sistema *AXYS Next Wave II* (G2), ambos instalados em um mesmo casco naval de uma boia *AXYS-3M* (Figura 1). Essa boia foi fundeada na Baía de Santos, no Campo de Sapinhoá, no dia 9 de dezembro de 2022.

Utilizando métodos estatísticos, foi possível avaliar a qualidade das medições realizadas. Em geral, observou-se uma alta correlação entre as medições de altura de onda obtidas pelos dois sistemas. No entanto, foram identificadas diferenças significativas, principalmente em relação à direção média e ao período de pico.

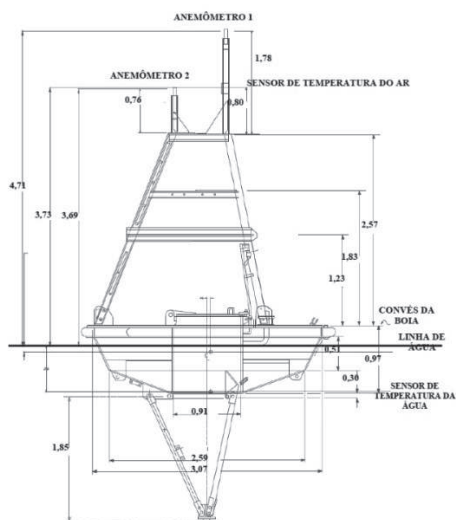


Figura 1 – Desenho técnico do casco *AXYS 3M*. Fonte: *Operations/Maintenance/reference manual for buoy base watchman 100 payloads: Brazilian Navy 3M ODAS*

2. DADOS E MÉTODO

2.1. Área de Estudo

A boia *AXYS-3M*, identificada como *AX24*, foi fundeada no dia 9 de dezembro de 2022 no Campo de Sapinhoá, na Baía de Santos, em uma profundidade de 2200m, na posição geográfica de latitude 25,8643°S e longitude 43,0437°W (Figura 2), utilizando o Navio Oceanográfico *Antares* (H-40).

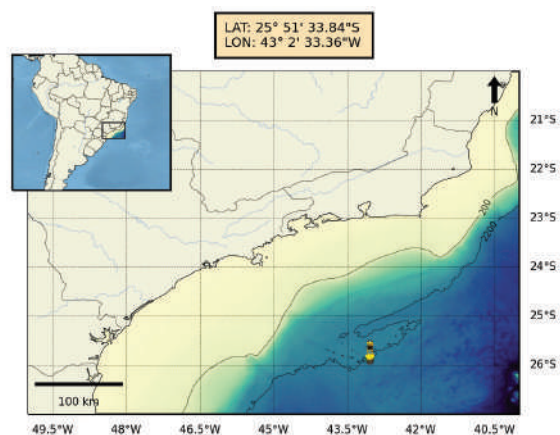


Figura 2 – Mapa de localização da boia *AX24*. Painel superior: Território Brasileiro com demarcação na sub-região de interesse. Painel inferior: Região aproximada, compreendendo a Baía de Santos e o ponto de fundeio da boia

2.2. Sistemas Ondógrafos

O sistema UCMO-1 (SBG) é composto por uma unidade de medição inercial (IMU) que integra três giroscópios, três magnetômetros e três acelerômetros. O elemento sensor utilizado é o SBG *ELLIPSE 2-A-G4A2-B1*, que fornece dados precisos de orientação em 6 graus de liberdade. Ele é capaz de realizar as medições necessárias para estimar os

parâmetros de ondas, como *heave*, acelerações xyz e os ângulos de Euler (SBG Systems, 2016). Os dados coletados pelo sistema são processados utilizando um filtro *Kalman* estendido, conforme descrito em SBG Systems (2016).

Os dados brutos do sensor e a informação de proa da boia são enviados continuamente para o *datalogger*. A cada hora, esses dados são integrados para calcular os parâmetros de ondas, gerando as séries processadas correspondentes.

O sistema *NextWave II* (G2) utiliza três acelerômetros e três giroscópios para medir os movimentos da boia com seis graus de liberdade. Os giroscópios medem a rotação tridimensional da boia, que é calculada a partir das posições instantâneas dos eixos x, y e z. O modelo G2 emprega um algoritmo exclusivo baseado na Transformada Rápida de *Fourier* (FFT) para resolver as equações não-lineares que relacionam os movimentos da boia com as acelerações e as taxas angulares medidas pelos sensores. O *software* de análise de movimento é baseado no sistema de medição de movimento inercial MOTAN, que é amplamente utilizado para medir os movimentos de modelos de navios e outras estruturas em tanques de ondas e tanques de reboque (Macisaac & Naeth, 2013).

Ambos os ondógrafos foram instalados no centro de gravidade de uma boia AXYS 3M (Figura 1) feita de alumínio soldado. A boia possui um diâmetro de 3,4m e é composta por seis compartimentos de flutuação estanques, além de um compartimento central também estanque, destinado ao *datalogger*, eletrônicos, baterias e sensores.

2.3. Dados

Neste estudo, foram analisados os dados horários de altura, período e direção média de ondas, que foram obtidos a partir das séries de movimentos medidas em alta frequência pelos sensores mencionados anteriormente. A análise abrangeu o período de 10 de dezembro de 2022 até 3 de abril de 2023.

Cabe ressaltar que os dados de movimento coletados em alta frequência são exclusivamente armazenados no *datalogger* e processados internamente, não estando disponíveis para análise no momento, devido à continuidade da operação da boia no mar até a presente data. Assim, este estudo concentrou-se estritamente nos dados resultantes do processamento espectral, que foram transmitidos via satélite. A partir deste ponto, esses dados horários serão referidos como séries brutas de parâmetros de onda.

2.4. Análise Estatística

A similaridade e ajuste entres os dados proveniente de ambos os sistemas foram quantificados através de quatro métricas estatísticas: RMSE, MAE, correlação de *Pearson* e dispersão. Tanto as séries brutas quanto as séries filtradas dos parâmetros de onda foram consideradas no cálculo dessas métricas

2.5. Dispersão

O gráfico de dispersão foi usado para investigar a existência de uma possível



relação entre os dados, avaliando se os valores convergem para um modelo linear. Nesse procedimento, é buscado um ajuste que minimize a variância dos pontos em relação a uma reta. O coeficiente de ajuste indica se o modelo de regressão linear se ajusta aos dados avaliados. Um valor próximo de 1 indica que os valores dos dados estão mais correlacionados (Thomson & Emery, 2014).

2.6. Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE é uma medida estatística que calcula o erro médio de um modelo preditivo em relação aos dados observados. Embora considere erros de diferentes magnitudes, o RMSE pode ser influenciado de forma desproporcional por erros maiores. No presente estudo, foi usado para avaliar as diferenças entre os valores obtidos pelos diferentes sensores (FEENSTRA *et al.*, 2019). O RMSE é definido como:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n e_j^2}$$

Onde:

e_j^2 representa o quadrado do erro entre as medições (dado_{SBG} - dado_{G2}).

n representa o número total de amostragens

j representa a indexação temporal dos dados

2.7. Erro médio absoluto (MAE)

O MAE é uma medida de erro amplamente utilizada para avaliar a precisão

de um modelo. Ele é calculado como a média dos valores absolutos das diferenças entre as previsões do modelo e os valores reais observados. O MAE mede a magnitude média dos erros em um conjunto de previsões, sem considerar se as previsões estão subestimando ou superestimando os valores reais. Um valor menor de MAE indica que o modelo tem uma melhor precisão em suas previsões.

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |e_j|$$

Onde:

$|e_j|$ representa o módulo do erro entre as medições (dado_{SBG} - dado_{G2}).

n representa o número total de amostragens.

j representa a indexação temporal dos dados.

2.8. Correlação de Pearson

O uso do coeficiente de correlação determina a relação entre duas propriedades. O coeficiente pode variar de +1 a -1. O valor de correlação mais próximo a 1 indica forte correlação. Já mais próximo de zero, indica correlação fraca. A equação para o coeficiente de correlação é:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

Onde: \bar{x} e \bar{y} são as médias da amostra média (G2) e média (SBG)

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados do ondógrafo SBG foram comparados com os dados obtidos pelo G2. As séries temporais brutas passaram por um controle de qualidade inicial, no qual foram excluídos todos os dados com *flags* indesejadas. A tabela 1 apresenta os registros válidos (*flag* 0) e os dados descartados. Os resultados mostraram uma performance geral superior do ondógrafo G2, com mais de 98% das amostras válidas em relação ao total. Por outro lado, o SBG teve 93,6% de dados válidos para o parâmetro com menor disponibilidade (período) e 97,9% de amostragens válidas para o parâmetro de maior disponibilidade (altura). Para esta série damos o nome de série bruta.

Além desta série bruta foram conduzidas análises sobre séries filtradas, neste processo ocorreu a exclusão de todo dado cuja magnitude é superior à média multiplicada por 2 desvios padrão ou de

magnitude inferior à média multiplicada por menos 2 desvios padrão. Este processo acabou invalidando dados de eventos extremos (passagem de frentes frias) contudo mantém-se coerência com o objetivo principal do trabalho, de comparação entre as séries obtidas.

3.1. Análise das séries brutas e filtradas

Em uma primeira abordagem foram analisadas as séries temporais, brutas e filtradas, para Altura, Período e Direção, assim como o erro entre as respectivas medições ao longo do tempo (Figuras 3 a 5), fornecendo um bom panorama a respeito do comportamento geral do sensor, para cada um dos parâmetros amostrados. Também foram tomadas as estatísticas básicas dos parâmetros amostrados por cada sensor, levando em consideração tanto os dados brutos (Tabela 2) quanto os dados filtrados (Tabela 3).

Tabela 1 – Porcentagens de dados válidos e inválidos, para cada parâmetro amostrado (“H” para altura, “T” para período e “Dir” para Direção Média) e respectivo sensor. *Flag* 0: dados considerados válidos; *Flag* 1: “missing values”; *Flag* 2: valores fora dos limites de medição dos sensores; *Flag* 6: valores duplicados; *Flag* 8: verificação de consistência temporal dos dados; *Flag* 9: valores fora dos limites climatológicos. Número total (N) de amostras horárias: 2608

	G2 (H)	SBG (H)	G2 (T)	SBG (T)	G2 (Dir)	SBG (Dir)
Flag 0 (%)	98,95	97,89	98,00	93,60	99,53	94,00
Flag 1 (%)	0,22	0,98	0,22	-	0,22	-
Flag 2 (%)	0,36	1,02	0,07	5,02	-	-
Flag 6 (%)	0,25	0,07	1,38	1,38	0,25	0,15
Flag 8 (%)	0,15	-	-	-	-	-
Flag 9 (%)	0,07	0,04	0,33	-	-	-



3.1.1. Altura de onda

Comparando os resultados obtidos para Altura, houve uma boa convergência entre os resultados do sensor de referência e o ondógrafo SBG. Nos painéis do lado esquerdo da figura temos as séries temporais dos dados de altura de onda dos dois sensores, sendo o painel superior correspondendo

direito). Observando as séries brutas podemos visualizar que ambos os sensores apresentaram dados duvidosos que fogem da tendência da curva. As estatísticas referentes às séries de ambos os ondógrafos estão listados na Tabela 2 e 3 (brutos e filtrados respectivamente). Com base na tabela é possível afirmar que de maneira geral o SBG subestima os valores das maiores

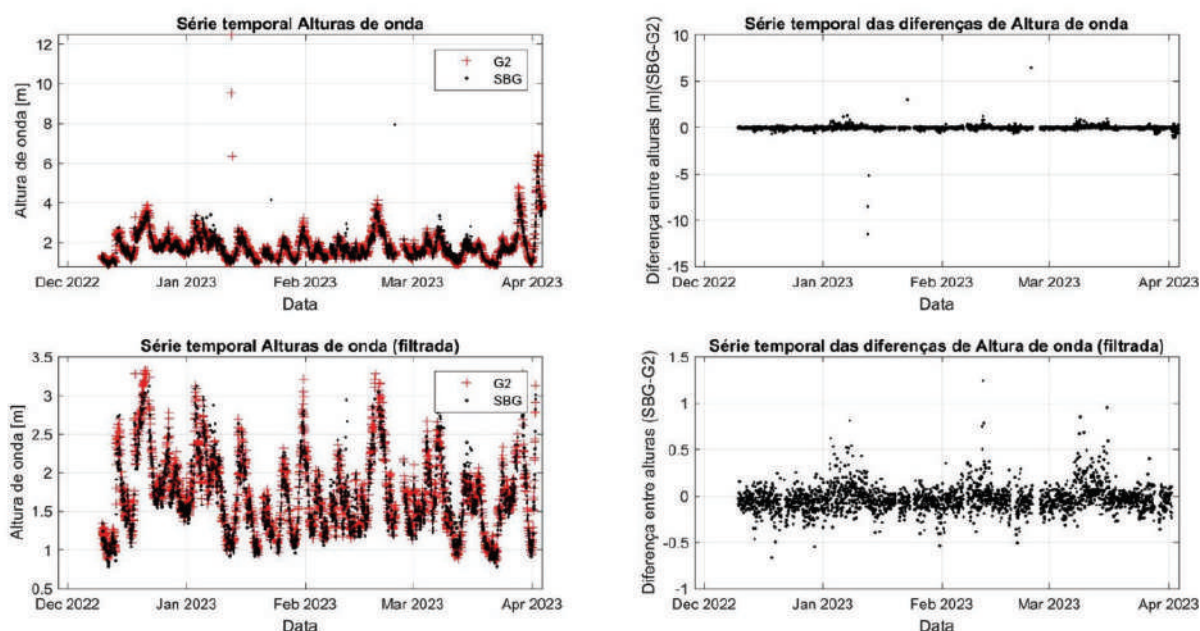


Figura 3 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Altura de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de altura filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

aos dados brutos e o painel inferior com os dados filtrados. Observa-se uma tendência entre as duas séries com um pequeno *offset* entre uma e outra. Os painéis do lado direito da figura representam o erro entre medições, ou seja, a diferença entre os valores medidos entre um sensor e outro, tanto para os dados brutos (superior direito) quanto para os dados filtrados (inferior

alturas de onda registradas. Em relação ao erro associado observamos um bom comportamento em torno do “zero” com pequenas oscilações positivas e negativas. Após a filtragem os limites superiores e inferiores (máximos e mínimos) foram ajustados dentro de um intervalo de confiança de 95%, sendo que as maiores magnitudes foram as mais afetadas pelo método.

3.1.2. Período de onda

As comparações entre os dados de Período de onda não foram tão satisfatórias, quanto o desempenho obtido para as Alturas de onda. A Figura 4 evidencia um desvio maior entre as curvas de ambas as séries e uma quantidade maior de pontos deslocados da curva de tendência, com atenção especial para as amostragens do G2, que nesse caso, apresentou elevado número de pontos dispersos e Período máximo de 28,6 s, na série filtrada este máximo e outros valores destoantes foram invalidados, o Período máximo contabilizado caiu substancialmente ao passo que o mínimo sofreu menor influência do método de filtragem. Nesse caso, de maneira geral, o SBG subestimou os valores, sobretudo dos maiores Períodos de onda. O erro assume uma forte tendência em

torno do zero com oscilações negativas e positivas mais expressivas.

3.1.3. Direção média de onda

A análise de direção exigiu uma filtragem mais rigorosa, tendo em vista que amostragens no limite inferior (próximas a zero graus) e no limite superior (próximas a 360 graus) podem conduzir a erros irreais nas análises estatísticas, foi estabelecido um intervalo de confiança de 20° a 340°, sob o qual foram feitas as análises das séries filtradas e posteriores análises de incerteza. Os piores resultados obtidos envolveram os dados de direção das ondas. A série amostrada pelo SBG apresenta aparência ruidosa e desvios largos comparados aos dados do G2, o mesmo comportamento é observado nas séries do erro entre medições.

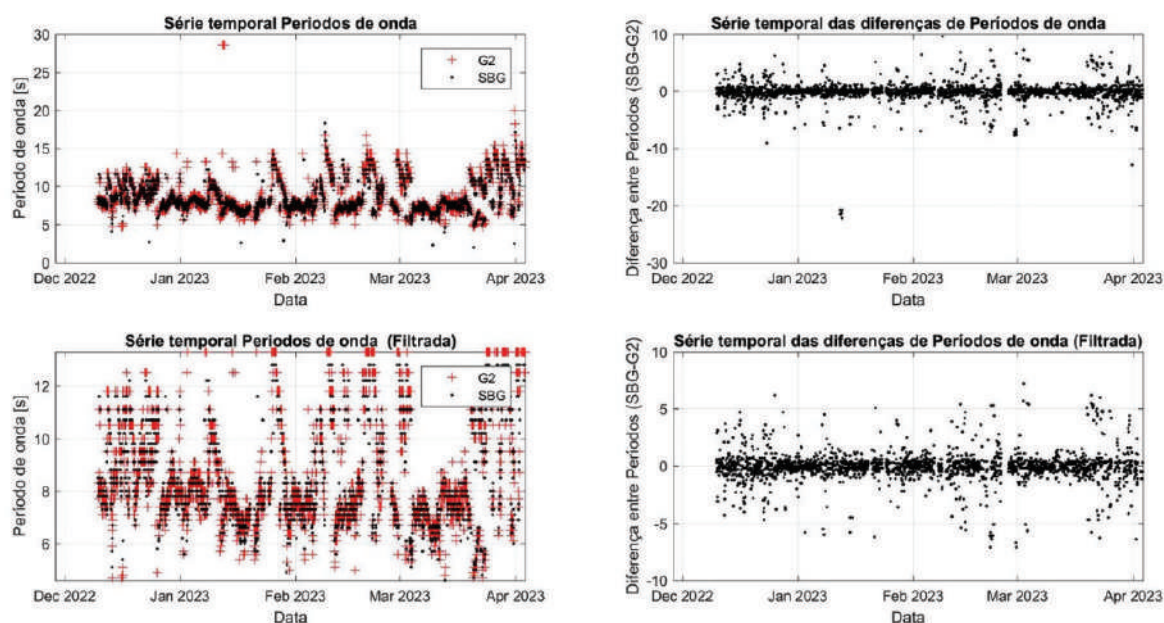


Figura 4 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Período de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de Período filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

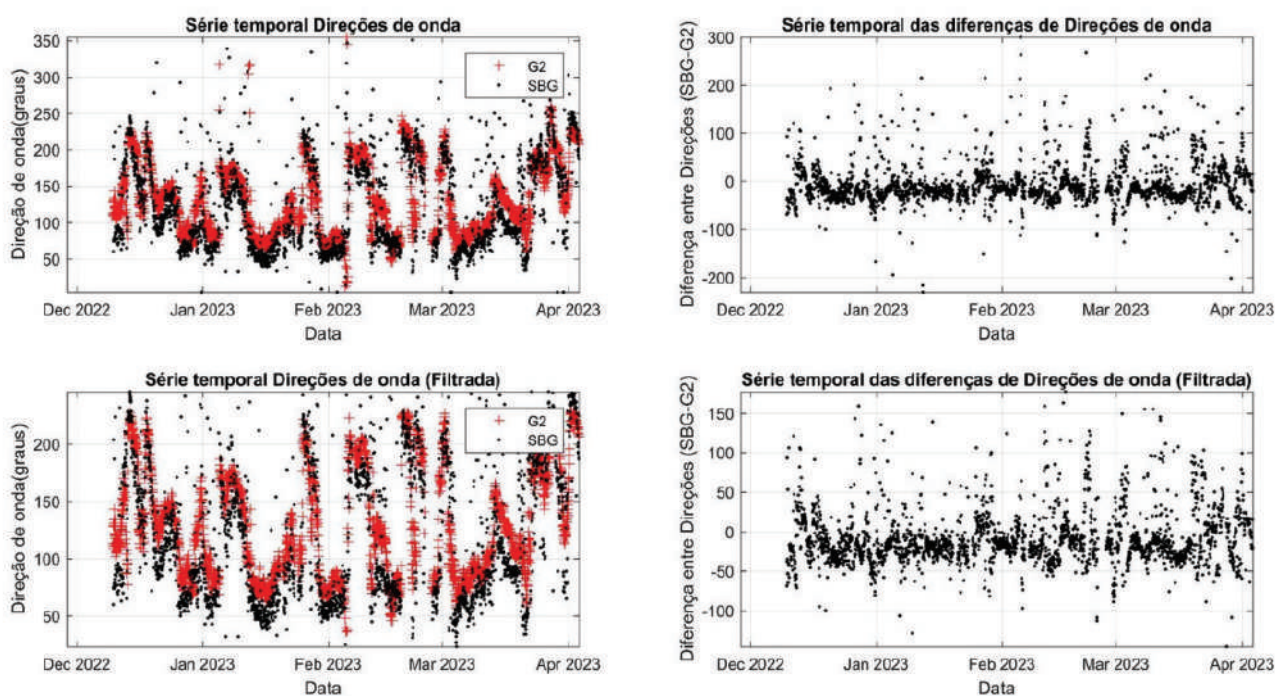


Figura 5 – Plotagem das séries temporais brutas, painéis superiores, e filtradas, painéis inferiores. Painel superior esquerdo série temporal com os dados de Direção de onda de ambos os sensores, Painel superior direito série temporal do erro associado às medições. Painel inferior esquerdo série temporal dos dados de Direção filtrados, Painel inferior direito série temporal do erro associado às medições, filtrados

Tabela 2 – Estatísticas básicas individuais de cada sensor e do erro entre eles, para cada parâmetro dos dados brutos

	Máx	Mín	Média	Desvio Padrão
G2 (H)	12,48m	0,86m	1,8187m	0,753m
SBG (H)	7,95m	0,78m	1,7719m	0,6768m
Erro (H)	6,43m	-11,48m	-0,0464m	0,3694m
G2 (T)	28,6s	4,7s	8,9157s	2,5132s
SBG (T)	18,3s	2s	8,8211s	2,1914s
Erro (T)	9,6s	-22,2s	-0,1508s	1,8101s
G2 (Dir)	355°	12°	130,2273°	49,3522°
SBG (Dir)	351°	4°	122,8675°	61,8395°
Erro (Dir)	300°	-231°	-7,2365°	41,3189°

Tabela 3 – Estatísticas básicas individuais de cada sensor e do erro entre eles, para cada parâmetro dos dados filtrados

	Máx	Mín	Média	Desvio Padrão
G2 Filt (H)	3,32m	0,86m	1,7097m	0,4938m
SBG Filt (H)	3,12m	0,78m	1,6677m	0,4746m
Erro Filt (H)	1,24m	-0,67m	-0,0333m	0,1391m
G2 Filt (T)	13,3s	4,7s	8,6092s	1,9985s
SBG Filt (T)	12,8s	4,6s	8,5438s	1,8038s
Erro Filt (T)	7,2s	-7,1s	-0,0496s	1,3249s
G2 Filt (Dir)	228°	36°	128,6440°	46,8078°
SBG Filt (Dir)	246°	23°	119,7270°	57,3735°
Erro Filt (Dir)	177°	-146°	-9,3672°	34,0095°

3.1.4. Histogramas direcionais

Para melhor compreensão e visualização dos resultados obtidos foram criados histogramas direcionais para Altura e Período de cada sensor (Figura 5) os histogramas ilustram apenas os dados com

frequência relativa (porcentagem sobre o total) significativa. Posteriormente estes resultados foram transformados em tabelas, nas quais, descrições mais detalhadas sobre estes resultados podem ser encontradas, estas tabelas estão no item 7 (Apêndice) deste trabalho.

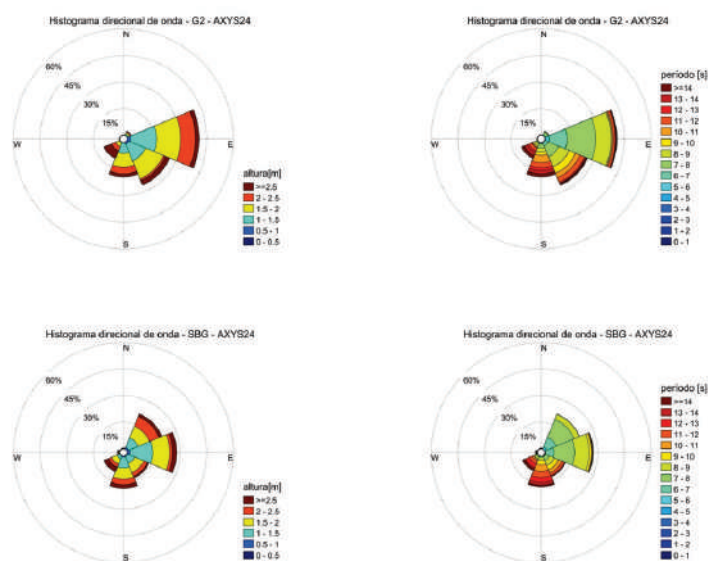


Figura 6 – Histogramas direcionais para Altura e Período. Painéis superiores dados do ondógrafo G2. Painéis inferiores, dados SBG



Assumindo os dados ondógrafo G2 como a representação da verdade de campo, pode-se aferir que o SBG começa a subestimar as amostras de classes de onda com maiores alturas e superestima a ocorrência de ondas com altura inferior a 0,5m. Em relação ao Período, o SBG se mostrou menos eficiente em amostrar períodos superiores a 13 segundos, além de ter registrado ondas com Períodos inferiores a 4 segundos que não foram expressivas na série do G2. A situação mais crítica ocorre com os dados de direção. O SBG superestimou em mais de 20% a ocorrência de ondas de NE e registrou cerca de 10% menos que o G2 para ondas do quadrante S e SE.

enfatizando apenas determinado aspecto das características do erro, sendo assim uma combinação de métricas são, geralmente necessárias, para acessar a performance das medições.

De acordo com as comparações do erro médio quadrático para os três parâmetros em análise, a métrica mostrou erros satisfatórios para as Alturas, tanto nas séries brutas como nas filtradas, contudo, as séries de dados filtrados apresentam melhor performance.

Apesar de o método ter apresentado um valor absoluto baixo para o Período (RMSE bruto = 1,816 e RMSE filtrado =

Tabela 4 – Resultado das métricas de comparação entre os dados dos dois sensores, para cada parâmetro analisado, séries brutas e séries

	RMSE	MAE	Corr. Pearson
Altura (m)	0,3772	0,1268	0,8716
Período (s)	1,8159	0,8631	0,7160
Direção (°)	41,9395	29,7835	0,7459
Altura Filtrada (m)	0,1430	0,1026	0,9576
Período Filtrado (s)	1,3256	0,7470	0,7495
Direção Filtrada (°)	35,2690	27,2972	0,8022

3.2. Análises estatísticas e incertezas

Para determinar o erro, três métricas estatísticas foram empregadas, a saber: RMSE, MAE e Correlação de *Pearson*. Os resultados obtidos para cada uma das métricas estão listados na Tabela 4. O emprego de uma única métrica fornece apenas uma projeção dos erros da amostra,

1,32), o erro é significativo pois, quando comparado à média, observamos que 1,8s de erro corresponde a cerca de 20% da magnitude da média dos Períodos.

Assim como o RMSE, o MAE é um método amplamente utilizado na quantificação de erro de modelos, porém o MAE tende a apresentar erros menores que o RMSE, pois seus cálculos fornecem o

mesmo peso aos erros (Chai & Draxler, 2014). O RMSE tende a se tornar maior que o MAE à medida que a magnitude dos erros se torna mais variável (Willmott & Matsuura, 2005). De acordo com Chai & Draxler (2014), o RMSE é uma métrica mais adequada quando o erro tem distribuição normal.

Dessa maneira, a razão RMSE/MAE, indiretamente, expressa a proporção de *outliers* nas análises, sendo a maior a quantidade de *outliers* quanto menor for a razão RMSE/MAE. Assim, pode-se concluir que os dados de altura e direção média de ondas são os que contêm, respectivamente, maior e menor número de dados espúrios.

O coeficiente de correlação de *Pearson* indica a relação com que as métricas variam. Nesse indicador, é possível verificar que, mesmo o período e a direção das ondas apresentando flutuações consideráveis em relação ao ondógrafo padrão, as variações temporais são, na maioria das vezes, no mesmo sentido.

3.2.1. Dispersão

Analisando os gráficos de dispersão para Alturas, temos uma distribuição bem homogênea em torno da reta de tendência, resultando em um coeficiente angular de 0,96853 e *offset* de 0,10224, indicando boa convergência dos resultados. Após a filtragem, no painel esquerdo, o valor de *offset* cai cerca de 24%.

Para Período de onda, a análise de regressão linear apresentou coeficiente angular (p_1) de 0,83 e um *offset* de 1.7 (p_2) para os dados brutos. Com a filtragem, observamos uma redução no coeficiente angular, indicando possível inadequabilidade do método, pois possíveis valores válidos podem ter sido considerados *outliers* durante a aplicação do filtro.

Para os valores de direção, o gráfico de dispersão apresentou coeficiente de reta p_1 igual a 0,5955 e um *offset* de 57° indicando fraca correlação entre as séries. Após a filtragem (figura 9, painel direito) o cenário melhora mas continua insatisfatório.

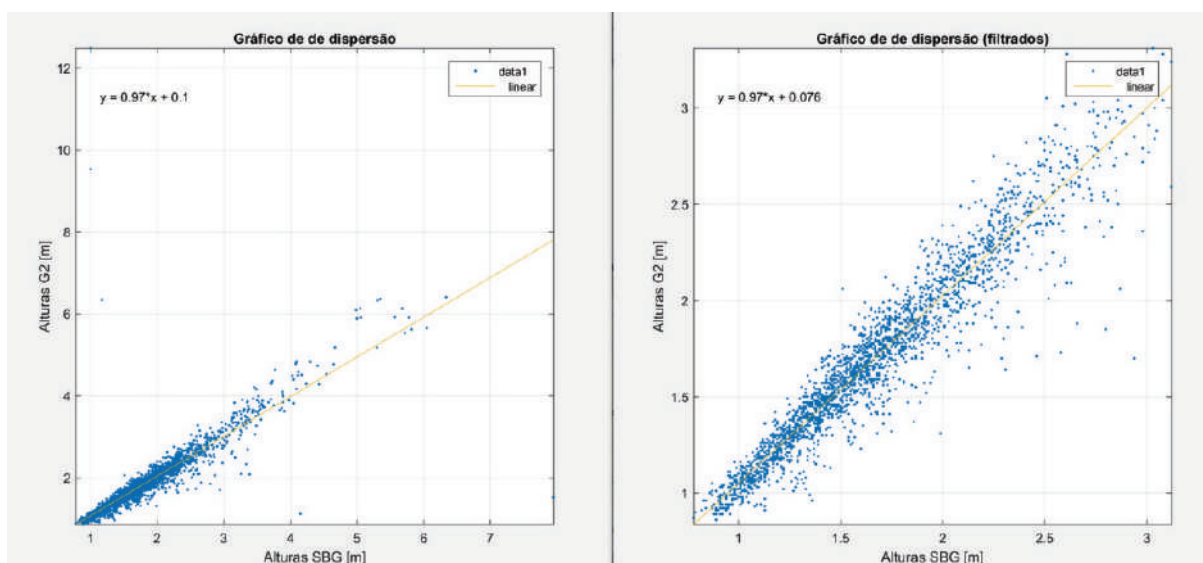


Figura 7 – Gráficos de dispersão para dados de Altura de onda brutos (esquerda) e filtrados (direita). Canto superior equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

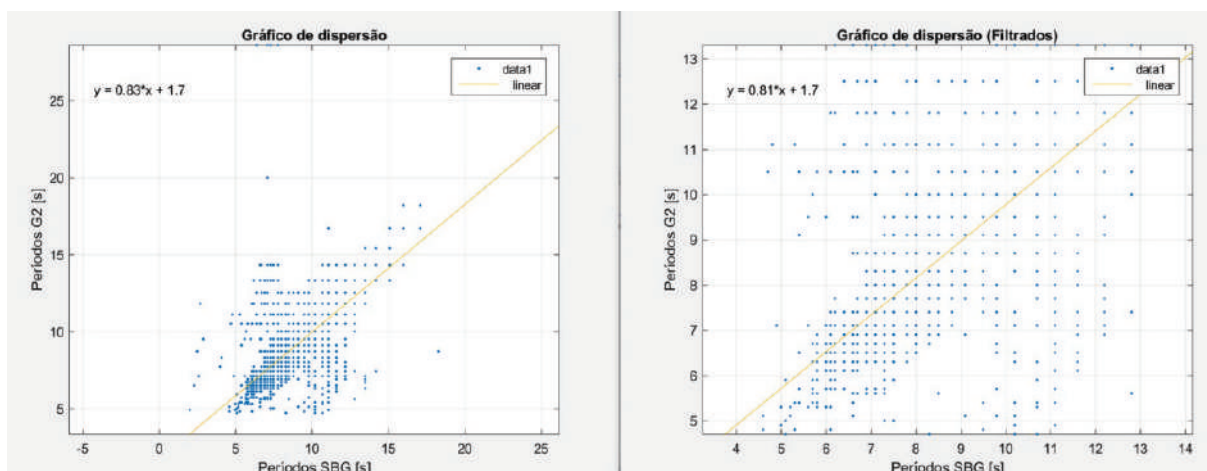


Figura 8 – Gráficos de dispersão para dados de Período de onda brutos (esquerda) e filtrados (direita). Canto superior equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

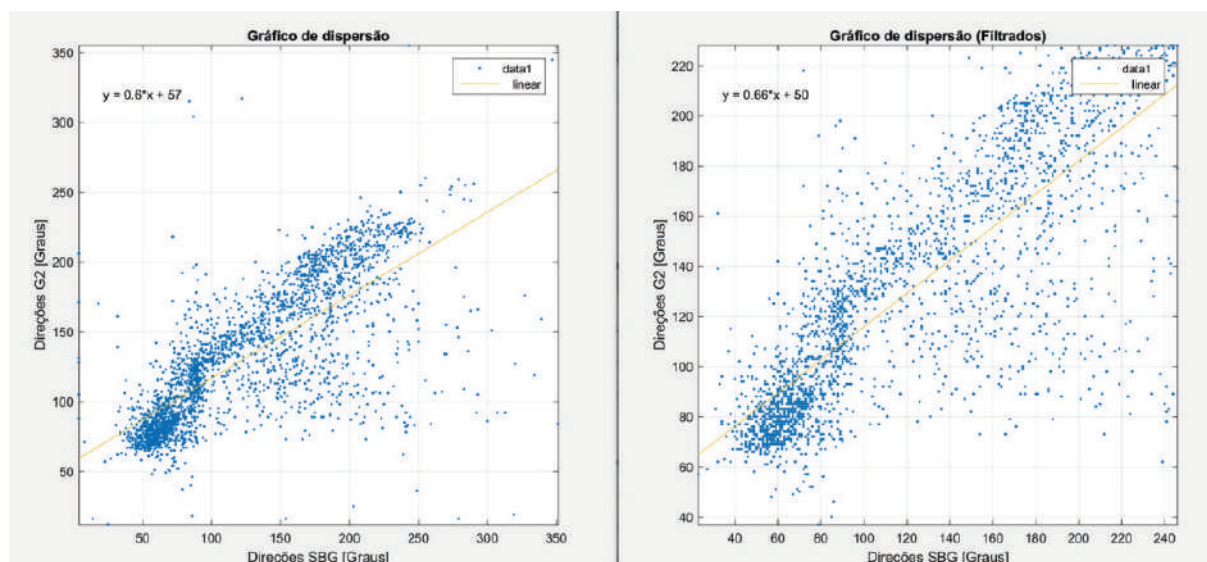


Figura 9 – Gráficos de dispersão para dados de Direção média de onda. Painel esquerdo: Dados brutos. Painel direito: Dados filtrados. Nos cantos superiores de cada painel equação da reta de tendência e seus respectivos parâmetros

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O resultado das filtrações indica que a distribuição de probabilidades das variáveis apresenta assimetria de natureza leptocúrtica. É importante ressaltar que o método de filtração afeta mais os extremos superiores do que os inferiores.

De maneira geral, a maior parte dos erros concentra-se nos extremos, tanto para período quanto para altura. Os valores mais baixos e mais altos apresentam fraca correlação entre os registros de cada sensor.

Ao comparar os valores de RMSE e MAE, observa-se que o SBG apresenta erros elevados para Período e direção média das ondas. As métricas estatísticas

utilizadas, sobretudo do RMSE, diminuem quando as séries temporais são filtradas.

Embora a correlação de *Pearson* indique variações no mesmo sentido, ao realizar a regressão linear, constata-se que o grau de dispersão dos dados de direção das ondas é muito elevado, ficando bastante abaixo do esperado em comparação com os dados de Período e, sobretudo, Altura.

Dessa forma, conclui-se que os dados de altura são satisfatórios, enquanto o período e a direção das ondas são considerados, respectivamente, aceitáveis e insatisfatórios.

As possíveis causas para a grande diferença na comparação dos dados de direção das ondas são: interferência magnética, falta de calibração da bússola, impropriedades no algoritmo de conversão dos dados, ajustes na banda do filtro de Kalman e o método de discretização dos parâmetros.

Por fim, é importante ressaltar que este trabalho não esgota o assunto

e que mais investigações devem ser realizadas com o objetivo de identificar a causa das distorções encontradas, visando o aperfeiçoamento da qualidade dos dados adquiridos pelas plataformas do PNBOIA/REMOBs.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), com investimentos de recursos oriundos das cláusulas de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (P,D&I) autorizadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), por meio dos Termos de Cooperação nº 2019/0206-1 e nº 2019/0207-8, como parte do Projeto REMO. Os autores agradecem ao Comandante do NOc Antares e à sua tripulação pela dedicação e esforço no bem-sucedido lançamento da boia AX24.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRANDON FEENSTRA, *et al*, *Performance evaluation of twelve low-cost PM2.5 sensors at an ambient air monitoring site*, *Atmospheric Environment*, Volume 216, 2019.

CHAI, T., & DRAXLER, R. R. *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE) - Arguments against avoiding RMSE in the literature*. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>.

LIMA, JOSE ANTONIO MOREIRA *et al*. *design and implementation of the oceanographic modeling and observation network (remo) for operational oceanography and ocean forecasting*. *Brazilian Journal of Geophysics*, [S.l.], v. 31, n. 2, p. 210 - 228, june 2013. ISS N2764-8044. Available at: <<https://SBGf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/290>>. Date accessed: 27 apr. 2023. doi:<http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i2.290>.



MACISAAC, C., & NAETH, S. TRIAXYS Next Wave II Directional Wave Sensor the evolution of wave measurements. OCEANS 2013 MTS/IEEE - San Diego: An Ocean in Common. SBG SYSTEMS. Ellipse Series. Datasheet, 1–9. Recuperado de http://www.SBG-systems.com/docs/Ellipse_Series_Leaflet.pdf.

THOMSON, R.E., and EMERY, W.J. *Data Analysis Methods In Physical Oceanography*. Elsevier. 3^o edition. Oxford, 2014.

WILLMOTT, C. AND MATSUURA, K.: Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the Root Mean Square Error (RMSE) in assessing average model performance, *Clim. Res.*, 30, 79–82, 2005. 1526, 1527, 1528, 1529.

7. APÊNDICE

Ondógrafo SBG									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.5m	0	1,148954	1,887567	0,451375	0,697579	0,246204	0,082068	0,041034	4,55478
0.5-1.0m	0,369307	13,78744	23,79975	10,66886	13,254	5,293394	0,697579	0,246204	68,11654
1.0-1.5m	0,082068	7,919573	2,790316	3,241691	4,513746	2,544112	0,697579	0,082068	21,87115
1.5m-2.0m	0,041034	0,123102	1,395158	0,164136	1,066886	1,395158	0,082068	0	4,267542
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,082068	0,574477	0,041034	0	0,697579
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0,369307	0	0	0,369307
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0,082068	0	0	0,082068
3.5-4.0m	0	0	0,041034	0	0	0	0	0	0,041034
TOTAL (%)	0,492409	22,97907	29,91383	14,52606	19,61428	10,50472	1,600328	0,369307	100

Ondógrafo G2									
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)
0-0.5m	0	0,038447	2,153018	1,153403	0,153787	0	0	0	3,498654
0.5-1.0m	0,307574	1,883891	28,25836	21,26105	13,76394	2,806613	0	0	68,28143
1.0-1.5m	0	0,884275	10,1115	2,268358	5,151865	3,652441	0,384468	0,038447	22,49135
1.5m-2.0m	0	0	0,269127	1,499423	0,230681	2,114571	0	0	4,113802
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,192234	0,730488	0	0	0,922722
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0,346021	0	0	0,346021
3.0-3.5m	0	0	0,038447	0	0	0,230681	0	0	0,269127
3.5-4.0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0-4.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5-5.0m	0	0	0	0	0	0	0,038447	0	0,038447
5.0-5.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5-6.0m	0	0	0	0	0	0	0	0,038447	0,038447
TOTAL (%)	0,307574	2,806613	40,83045	26,18224	19,4925	9,880815	0,422914	0,076894	100



Ondógrafo SBG										
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)	
2-3s		0	0	0,085911	0,085911	0	0	0	0	0,171821
3-4s		0	0	0	0	0	0	0	0	0
4-5s		0	0,085911	0,128866	0,042955	0	0,042955	0	0	0,300687
5-6s		0	1,37457	0,300687	0,257732	0	0,085911	0	0	2,0189
6-7s	0,128866	6,572165	5,24055	0,472509	0,128866	0,171821	0,171821	0,042955	12,92955	12,92955
7-8s	0,085911	12,28522	13,2732	2,534364	0,730241	0,816151	0,386598	0,042955	30,15464	30,15464
8-9s	0,042955	3,565292	9,106529	3,30756	1,975945	1,245704	0,214777	0	19,45876	19,45876
9-10s	0	0	1,589347	2,963918	2,835052	0,515464	0,214777	0	8,118557	8,118557
10-11s	0,085911	0,085911	0,515464	2,233677	4,166667	1,073883	0,042955	0,042955	8,247423	8,247423
11-12s	0,128866		0	0,257732	1,632302	3,694158	1,804124	0,085911	0	7,603093
12-13s	0	0	0,042955	0,601375	3,221649	2,534364	0,128866	0	6,52921	6,52921
13-14s	0	0	0,042955	0,128866	1,675258	0,902062	0,128866	0,042955	2,920962	2,920962
14-15s	0	0	0	0	0,773196	0,730241	0,042955	0	1,546392	1,546392
TOTAL (%)	0,472509	23,96907	30,58419	14,26117	19,20103	9,92268	1,417526	0,171821	100	

Ondógrafo G2										
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	TOTAL (%)	
4-5s		0	0	0,389257	0,077851	0,038926	0,038926	0	0	0,544959
5-6s	0,038926	0,038926	2,218762	0,155703	0,467108	0,038926	0	0	2,95835	2,95835
6-7s	0,194628	0,661736	10,1596	2,101985	0,311405	0,233554	0,077851	0	13,74076	13,74076
7-8s	0,038926	1,712729	16,30985	6,578435	2,296613	0,661736	0,155703	0	27,75399	27,75399
8-9s	0,038926	0,389257	8,991826	6,344881	2,374465	1,401323	0,077851	0,038926	19,65745	19,65745
9-10s	0	0	0,544959	4,009342	1,907357	0,89529	0,038926	0	7,395874	7,395874
10-11s	0	0,038926	0,62281	2,724796	4,281822	0,467108	0,038926	0	8,174387	8,174387
11-12s	0	0	1,206695	2,763721	2,802647	1,634877	0	0	8,407941	8,407941
12-13s	0	0	0,467108	0,700662	1,595952	1,050993	0	0	3,814714	3,814714
13-14s	0	0	0,27248	0,350331	1,907357	1,907357	0	0	4,437524	4,437524
14-15s	0	0	0,116777	0,467108	1,206695	1,323472	0	0	3,114052	3,114052
TOTAL (%)	0,311405	2,841573	41,30012	26,27482	19,19035	9,653562	0,389257	0,038926	100	

Ondógrafo SBG												
	4-5s	5-6s	6-7s	7-8s	8-9s	9-10s	10-11s	11-12s	12-13s	13-14s	14-15s	TOTAL (%)
0-0.5m	0,041	0,410004	0,533005	1,312013	1,02501	0,246002	0,738007	0,328003	0	0	0	4,633046
0.5-1.0m	0,246002	1,517015	10,94711	21,44321	11,64412	5,494055	5,945059	5,781058	3,690037	1,107011	0,615006	68,42968
1.0-1.5m	0	0	1,599016	7,298073	6,724067	1,148011	1,271013	0,861009	1,599016	1,066011	0,205002	21,77122
1.5m-2.0m	0	0	0	0,164002	0,369004	1,107011	0,246002	0,533005	1,107011	0,410004	0,164002	4,100041
2.0-2.5m	0	0	0	0	0,041	0	0,041	0	0,123001	0,287003	0,246002	0,738007
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0	0	0	0,041	0,041	0,205002	0,287003
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,041	0,041
TOTAL (%)	0,287003	1,927019	13,07913	30,2173	19,8032	7,99508	8,241082	7,503075	6,560066	2,911029	1,476015	100

Ondógrafo G2												
	4-5s	5-6s	6-7s	7-8s	8-9s	9-10s	10-11s	11-12s	12-13s	13-14s	14-15s	TOTAL (%)
0-0.5m	0,155703	0,350331	0,467108	0,89529	0,62281	0,077851	0,62281	0,155703	0,038926	0	0	3,386532
0.5-1.0m	0,389257	2,608019	11,40522	19,69638	11,87232	5,021409	5,799922	6,811989	2,06306	1,595952	1,284547	68,54807
1.0-1.5m	0	0	1,868431	7,006617	6,461658	1,362398	1,440249	0,856364	1,050993	1,595952	1,089918	22,73258
1.5m-2.0m	0	0	0	0,155703	0,700662	0,934216	0,311405	0,428182	0,467108	0,817439	0,311405	4,126119
2.0-2.5m	0	0	0	0	0	0	0	0,116777	0,155703	0,350331	0,194628	0,817439
2.5-3.0m	0	0	0	0	0	0	0	0,038926	0,038926	0,038926	0,116777	0,233554
3.0-3.5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,038926	0,116777	0,155703
TOTAL (%)	0,544959	2,95835	13,74076	27,75399	19,65745	7,395874	8,174387	8,407941	3,814714	4,437524	3,114052	100



ANÁLISE PRELIMINAR DE DADOS BRUTOS DO MARÉGRAFO DE PRESSÃO PARA UTILIZAÇÃO EM LEVANTAMENTOS HIDROCEANOGRÁFICOS POR MEIO DE UMA SÉRIE TEMPORAL DE UMA SEMANA NO COMPLEXO NAVAL DA PONTA DA ARMAÇÃO

Elias de Castro Nadaf^{1*}
*Gregório Luiz Galvão Teixeira*²
*Pedro Foloni*³
*Leonardo Araujo Costa*⁴
*Leonardo Ferraz Garcia*⁵
*Heraldo Soares Caldeira*⁶

RESUMO

Um dos principais óbices da hidrografia está no levantamento de dados maregráficos de maneira remota, a fim de reduzir a sondagem ou definir *data* em regiões distantes da linha de costa. Uma das soluções que estão sendo aplicadas há algumas décadas é o uso de marégrafos de pressão. Embora ocorra a larga aplicação destes marégrafos, há necessidade da validação deles para as atividades fins. Este trabalho tem como objetivo a análise preliminar com dados de uma semana. Como método de comparação foram calculados parâmetros estatísticos – Desvio Padrão, Tendência, Correlação de *Pearson* e RMSE. Estes parâmetros foram compilados em um Diagrama de Taylor para auxiliar na tomada de decisão. Os resultados mostram que há uma instabilidade na aquisição durante o período de quadratura. Esse fato resultou em uma baixa incerteza nos dados do MP,

¹ Oficial do Corpo da Armada, M. Sc. em Meteorologia e Oceanografia Física pela *Naval Postgraduate School*, e Encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do CHM. Email: nadaf@marinha.mil.br

² Oceanógrafo físico, M. Sc. em Eng. Ambiental pela UFES, e Professor de Marés e Geologia e Geofísica do CIAARA,

³ Oceanógrafo pela USP, M. Sc. em Dinâmica Costeira pela USP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: p.foloni@gmail.com

⁴ Oceanógrafo pela UERJ e Engenheiro Mecatrônico pela UNICESUMAR, pós-graduação em sistemas offshore pela UFRJ, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional.

⁵ Engenheiro Mecânico pela UNIP, e colaborador técnico na área de eletrônica do projeto REMO Observacional. Email: leonardo-fg1980@gmail.com

⁶ Oficial do Corpo da Armada (RM-1), M.Sc. em Sensoriamento Remoto pelo INPE, e Professor de Teoria dos Erros do CIAARA.

indicando, a princípio, uma inviabilidade do uso deste para fins hidrográficos.

Palavras-chave: Nível do Mar, Análise estatística, Diagrama de Taylor e Marégrafo de pressão.

ABSTRACT

One of the main hurdles in hydrography is the remote survey of tide data in order to bring sounding to the reference level or define data in regions far from the coastline. One of the solutions that has been applied for some decades is the use of pressure tide gauges. Despite the wide application of these tide gauges, there is a need to validate them for the core activity. The objective of this work is the preliminary data analysis of one week collection. As a method of comparison, the statistical parameters such as Standard Deviation, Trend, Pearson Correlation and RMSE were calculated. These parameters were compiled into a Taylor Diagram to assist in decision making. The results show that there is instability in the acquisition during at low tide. This resulted in a low uncertainty in the pressure tide gauge data, indicating, in principle, an impracticability of its use for hydrographic purposes.

Keywords: Sea Level, Statistical Analysis, Taylor Diagram and Pressure Tide Gauges.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo do nível do mar tem sua importância relatada há centenas de anos. Entre seus diversos

usos podemos destacar a previsão destes níveis em função, principalmente, da característica determinística da maré, e da definição dos *data* verticais, como por exemplo, o Nível de Redução (NR) (FRANCO, 2009). Ambas as aplicações estão estreitamente ligadas às atividades dos serviços hidrográficos distribuídos ao longo do globo.

Além da qualidade dos dados das séries temporais (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021), o seu comprimento influencia significativamente na confiabilidade dos parâmetros hidrográficos. Teixeira *et al.* (2017), analisaram séries temporais de 15 dias a 1 ano e observaram um impacto não linear do comprimento da série no estabelecimento das constantes harmônicas da maré, no Z_0 e no NR. Dessa maneira, o *Datum* náutico, o NR, é tão melhor estabelecido quanto maior a série temporal de nível do mar adquirida, e, por conseguinte, entende-se que a carta náutica que faz uso desse NR tem maior confiabilidade. Além das oscilações astronômicas, a maré e as variações não-astronômicas do nível médio do mar (NMM) também têm seus impactos diretos na segurança da navegação, principalmente pela sua baixa previsibilidade (COELHO, 2016; PRATS, 2017; MELO F^o, 2017; FUCHS *et al.*, 2021).

Tradicionalmente, o monitoramento operacional do nível do mar era feito através de marégrafos analógicos, grandes sistemas de engrenagem que, através de um sistema boia-contrapeso atrelado a uma relojoaria e de uma pena, transferiam os movimentos do nível mar para um papel, denominado maregrama (PUGH,



1987). Os principais óbices eram a troca do maregrama e, depois, a extração destes dados do papel para uma planilha de análise de dados.

Com o advento das registradoras digitais, a operacionalidade destes marégrafos foi aumentada, uma vez que elas permitem um maior tempo de registro sem a necessidade de interferência humana, assim como a aquisição de dados já digitalizados para se efetuar um pós-processamento.

O sistema boia-contrapeso, amplamente denominado marégrafo boia-contrapeso (MBC), é utilizado ainda hoje, em larga escala no monitoramento do nível do mar (NM) e apresenta erros significativos em regiões com condições severas de mar, devido às ondas e correntes (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021). A filtragem física feita através de furos no tubo onde o sistema é instalado permite a aquisição de dados com baixa taxa de ruído de alta frequência. Uma outra dificuldade do uso desse sistema para a obtenção de dados no NM é a necessidade de uma linha de costa para a sua fixação e, muitas vezes, do apoio em obras costeiras, necessitando, portanto, de um trabalho de alvenaria. Na Figura 1 está esquematizado o MBC que é estabelecido dentro do tubo amortizador.

Com o intuito de permitir uma maior flexibilidade na medição do NM, equipamentos como os sistemas de pressão (SP) ou o marégrafo de pressão (MP) vêm sendo aperfeiçoados até o nível de podermos adquirir dados com alto índice de confiabilidade, se comparados com o MBC. Estes sistemas são resistentes

a regiões polares, as quais apresentam cobertura recorrente de gelo, e a regiões da Bacia Oceânica em geral, resistindo a profundidade de milhares de metros (BUSHNELL e WORTHINGTON, 2021). Este tipo de marégrafo utiliza a variação da pressão hidrostática (p_m) através da piezeletricidade, para estimar as variações das alturas do nível do mar (h) em relação ao equipamento (Eq.1).

$$h(t) = \left(\frac{(p_m(t) - p_a(t))}{-\rho g} \right) - NMM \quad \text{Eq.1}$$

Os dados de pressão adquiridos devem ser corrigidos da pressão atmosférica (p_a), através de um barômetro próximo do local da medição e da densidade da água. Um dos problemas na utilização desses equipamentos está relacionado com a deriva de dados que ocorrem em sensores de baixa qualidade. Assim, testes comparativos do SP com outro de referência é uma forma de validar a função operacional do equipamento. Por fim, uma das principais vantagens do SP pode estar relacionada ao fato de não haver a necessidade da instalação dele junto à linha de costa. Este fato pode vir a contribuir com levantamentos hidrográficos em regiões remotas, afastadas da costa ou em locais em condições meteoceanográficas mais hostis.

A partir da comparação do potencial operacional dos sistemas boia-contrapeso e pressão, verifica-se que o conhecimento sobre a robustez da aquisição de dados de NM via SP é de suma importância para avanços das práticas hidrográficas operacionais. Sendo assim, este trabalho visa iniciar o procedimento de comparação

entre esses sistemas a partir de parâmetros estatísticos, pressupondo que é possível galgar resultados ajustados, que permitirão o uso do SP como forma redundante de monitoramento do NM.

1.1. Objetivos

Objetivo Geral

Conduzir um estudo preliminar de viabilidade do uso do marégrafo de pressão em substituição ao sistema boia-contrapeso por meio de uma série temporal de uma semana.

Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos objetivos específicos, a saber:

- Estabelecer uma estação de monitoramento do nível do mar com um marégrafo de boia-contrapeso;
- Estabelecer um ponto de monitoramento do nível do mar com o marégrafo de pressão;
- Calcular parâmetros estatísticos individuais utilizando os dados brutos para ambas as séries temporais dos marégrafos de pressão e boia-contrapeso;
- Calcular a similaridade e coerência entre as curvas.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A Estação Maregráfica de Teste (EMT), indicada na Figura 1, encontra-se no Sistema Estuarino da Baía de Guanabara (SEBG), localizado na cidade do Rio de Janeiro – RJ (Figura 2). Esta

estação está localizada no Complexo Naval da Ponta da Armação (CNPA), sede da hidrografia no Brasil.

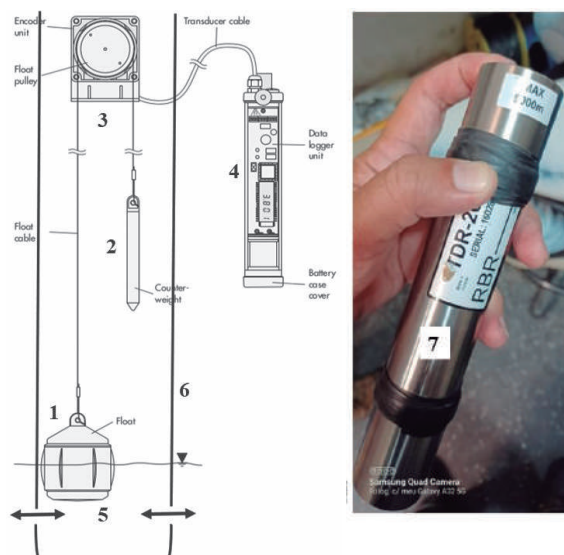


Figura 1 – À esquerda, o MBC Thalimedes da OTT, com seus seis componentes, roldana, registradora, orifícios do tubo e tubo amortizador. Adaptado de OTT (2023). E, à direita do MP TDR-2050 da RBR, com encapsulamento de titânio do sistema piezelétrico. Fonte: Autores

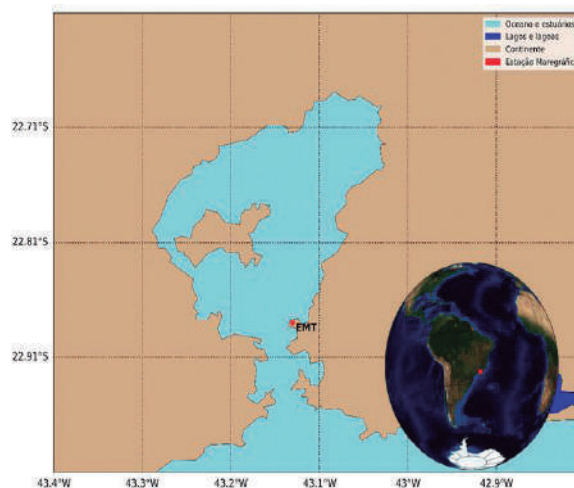


Figura 2 – Mapa da localização geográfica da área de estudo adjacente da EMPA, que está localizada no SEBG

2.2. Dados

Os dados de alturas do nível do mar foram adquiridos entre 12:00AM de 30/03/2023 e 11:00AM de 17/04/2023,



com uma taxa de aquisição de 5 min por meio de dois equipamentos que serão descritos a seguir.

O MBC utilizado foi o Thalimedes/OTT, como apresentado na Figura 1, que tem sua aquisição feita por meio de um sistema de boia e contrapeso e armazenado digitalmente em uma registradora. Suas dimensões são vantajosas uma vez que é viável a acomodação do sistema dentro do próprio tubulão. A estabilidade do sistema frente aos novos sistemas é comprovada, permitindo utilizá-lo como referência. Esse sistema é tradicionalmente utilizado na aquisição de dados de nível do mar na Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), bem como nos principais serviços hidrográficos ao longo do globo.

O outro foi o MP TDR-2050/RBR. Sua flexibilidade e baixo custo de instalação é normalmente conflitado com a sua instabilidade. Internamente o sensor de pressão é composto basicamente de um sensor de pressão localizado na parte inferior, um microcontrolador e um chip de armazenamento, como mostrado na Figura 3.

2.3. Estatística

Como neste trabalho as séries temporais de nível do mar são referenciadas no nível médio do mar, as representações estatísticas serão utilizadas para a comparação e o cálculo das características individuais, e para observar a similaridade dessas séries (THOMSOM e EMERY, 2014). Para tanto serão calculados o desvio padrão, a raiz do erro quadrático médio e a correlação.

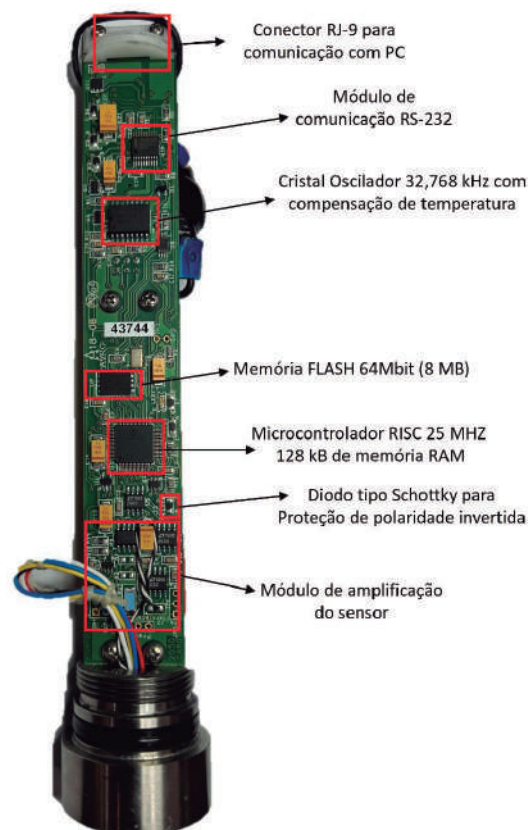


Figura 3 – Imagem esquematizada dos principais componentes do MP TDR-2050/RBR

2.3.1. Desvio Padrão (DP)

O desvio padrão é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio. Devido à grande quantidade de dados, o desvio será calculado do DP populacional segundo a equação a seguir:

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{Eq.2}$$

Onde: x_i é o valor na posição i na amostra, \bar{x} é o valor médio dos dados, e n é o tamanho da amostra.

2.3.2. Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)

Este parâmetro expressa a capacidade de previsão de modelos em relação aos dados de referência. Aqui ele será adotado para avaliar o erro dos dados dos marégrafos de pressão e radar em relação ao marégrafo de boia-contrapeso. Esse parâmetro será calculado de acordo com a equação abaixo

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2}{n}} \quad \text{Eq.3}$$

Onde: y são os valores dos dados observados pelos marégrafos de pressão e radar. \hat{y}_j são os valores de altura do marégrafo (MBC) e n é o tamanho da amostra.

2.3.3. Correlação de Pearson (CP)

O uso do coeficiente de correlação determina a relação entre duas propriedades. O coeficiente pode variar de +1 a -1. O valor de correlação mais próximo a 1 indica alta correlação. Já mais próximo de zero, indica baixa correlação. Nesse trabalho, correlacionamos os métodos entre si, em função da covariância de dois em dois, para avaliar se há uma relação linear entre os níveis não-astronômicos mais próximos da unidade.

A equação para o coeficiente de correlação é:

$$CP(X, Y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad \text{Eq.4}$$

Onde: \bar{x} e \bar{y} são as médias amostrais.

2.3.4. Dispersão

O gráfico de dispersão nesse trabalho foi usado para ilustrar a possível relação entre os dados do nível médio diário de cada filtro. A técnica dos mínimos quadrados é uma das mais usadas para ajustar um parâmetro de modelo dependente y à variável independente x_i ($i=1, 2, \dots, N$), em termos de estimação linear, ou seja, os dados convergem para um modelo no qual os dados têm uma relação linear. Esse procedimento de mínimos quadrados é um ajuste que minimiza a variância dos pontos de dados da linha ajustada, ou seja, possui menos desvios dos dados. (THOMSON e EMERY, 2014).

2.4. Diagrama de Taylor (DT)

O DT é um método, proposto por Taylor (2001), que compila os principais parâmetros estatísticos para se efetuar a comparação entre modelos/testes e uma certa referência. Na Figura 4, apresenta-se a construção básica do diagrama, com valores de DP variando concentricamente, CP variando radialmente e, por fim, o RMSE entre os modelos/testes e a referência, representado nas linhas tracejadas.

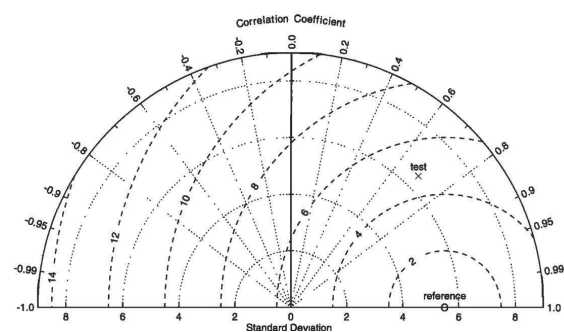


Figura 4 – Gráfico de espalhamento dos dados de maré do marégrafo de pressão. Fonte: Taylor (2001)



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas figuras 5 e 6 estão apresentadas as curvas com os dados do marégrafo boia-contrapeso (MBC) em laranja; marégrafo de Radar (MR) em azul; marégrafo de pressão (MP) em verde e, por fim, dados do marégrafo de pressão com correção da pressão atmosférica (MPc) em vermelho. Todos os dados foram reduzidos da média, e, portanto, estão reduzidos do nível médio do mar, resultando, assim, em valores de níveis positivos e negativos.

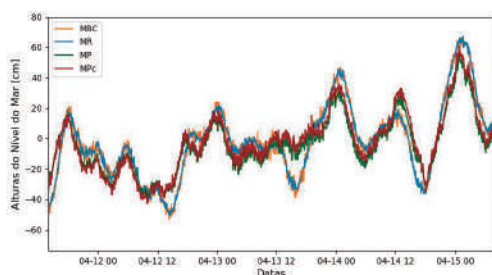


Figura 5 – Nível do mar reduzido ao NMM no período de quadratura. Fonte: Autores

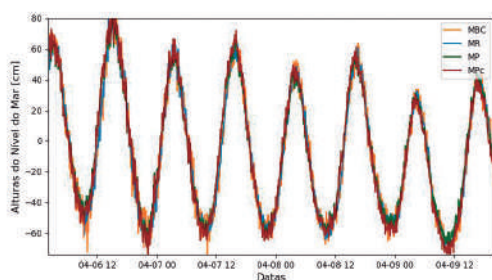


Figura 6 – Nível do mar reduzido ao NMM no período de sizígia. Fonte: Autores

Comparando-se os dados coletados pelo marégrafo de pressão com os dados dos marégrafos radar e de boia-contrapeso, no período de quadratura, exibidos na figura 5, é possível notar que o marégrafo de pressão não foi capaz de representar as variações de maré em determinados momentos desse ciclo. Não

obstante, ainda nos momentos em que as medições acompanham o MBC e o MR, as leituras não são representadas com precisão.

Em oposição ao período de quadratura, as medições do marégrafo de pressão para o período da sizígia, mostradas na figura 6, foram comparáveis às leituras dos marégrafos radar e boia-contrapeso, tanto em fase quanto em amplitude.

A tabela 1 mostra o desvio padrão, a correlação de *Pearson*, o erro médio quadrático e a tendência calculados para os marégrafos de pressão, marégrafo de pressão com correção da pressão atmosférica e o marégrafo radar.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos das amostras dos marégrafos de pressão, pressão corrigida e de Radar

Parâmetro	MP	MPc	MR
DP	32.83	34.42	35.56
CP	0.96	0.96	0.99
RMSE	9.27	9.92	4.40
Tendência	1.04	0.99	1.00

Apesar de os valores calculados para os desvios padrão serem próximos ao se aplicar a correção da pressão atmosférica, o desvio padrão dos dados coletados pelo marégrafo de pressão se torna mais próximo do marégrafo radar, utilizado como um dos instrumentos para comparação que se aproximam da realidade.

Nota-se, também, que o marégrafo de pressão e o respectivo resultado corrigido da pressão atmosférica apresentam menor correlação quando comparados ao marégrafo radar. Tal resultado é esperado e pode ser atribuído, em grande parte, à falha do marégrafo de pressão ao acompanhar

as medições no período de quadratura. Da mesma maneira, o erro médio quadrático (RMSE) é de aproximadamente 10 cm, o que é significativo para atividades de maré com aplicações hidrográficas, como salienta Silva *et al.* (2014).

Por fim, a tendência das séries temporais, em relação ao marégrafo boia-contrapeso, está bem ajustada, próxima da unidade.

A Figura 7 sintetiza graficamente os dados estatísticos obtidos nas análises realizadas anteriormente. O gráfico da esquerda mostra o espalhamento dos dados de maré do marégrafo de pressão (MP), marégrafo de pressão compensado da pressão atmosférica (MPc), maré do marégrafo de radar (MR) em relação ao marégrafo boia-contrapeso (MBC), que é a referência. Como esperado, o MR apresenta menor espalhamento, o que reflete em sua maior correlação com a referência. O gráfico da direita representa o Diagrama de Taylor dos dados do MP, MPc, MR e o MBC como referência (estrela preta).

de *Pearson* e o RMSE dos MP, MPc e MR, tomando-se como referência o MBC.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Dentro do escopo da análise estatística dos dados do MP nas atividades hidrográficas, avaliou-se a aplicabilidade destes dados como inviável. A incerteza do MP é de aproximadamente 10 cm, o que é considerado significativo nas atividades maregráficas. A limitação deste trabalho foi a série temporal curta, o que pode ter influenciado na estatística e não permitido a análise de alguma instabilidade na aquisição para o período específico. É visível a instabilidade da aquisição no período de quadratura, o que pode estar relacionado com a resolução de equipamento ou com a filtragem padrão, ou ainda pelo atraso em fase. Sendo assim, é recomendado o teste com outros MP com maiores quantidades de ciclos de maré. Fruto dessa

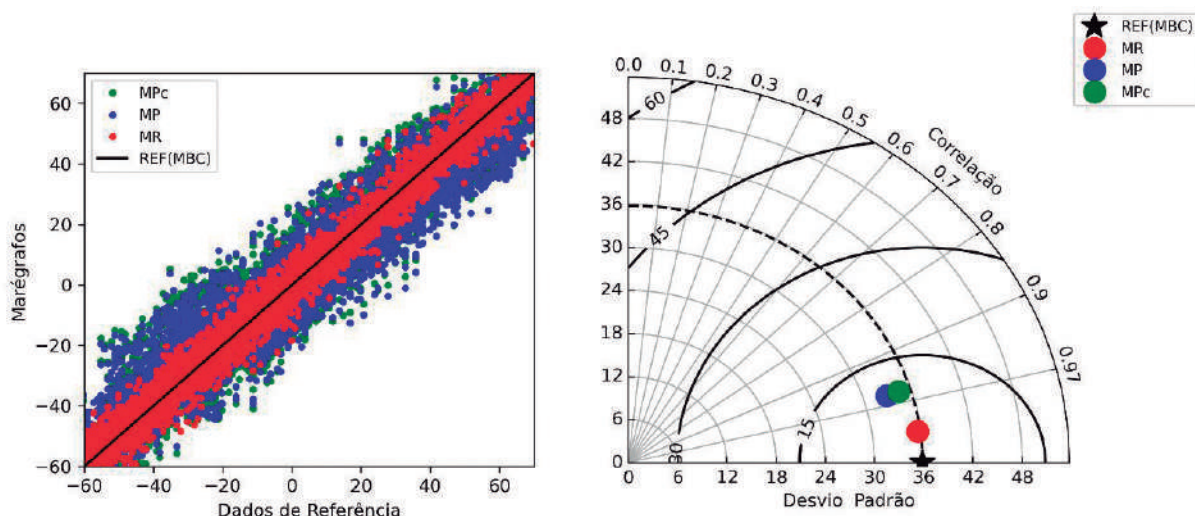


Figura 7 – À esquerda, o gráfico de espalhamento dos dados do marégrafo de pressão (MP), marégrafo de pressão compensado da pressão atmosférica (MPc), do marégrafo de Radar (MR) e a referência (linha preta), que representa o nível corrigido do marégrafo de boia e contrapeso (MBC). À direita, o Diagrama de Taylor dos dados do MP, MPc, MR e o MBC como referência (estrela preta). Fonte: Autores



recomendação, um MP foi instalado e adquirirá dados em um período de 30 dias para posterior comparação. Por fim, devido ao bom desempenho do equipamento no

período das maiores amplitudes, recomenda-se, também, o teste do equipamento em regiões de meso ou macromaré, como, por exemplo, a região norte do Brasil.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBIERI, E.; COE-NETO, R. *Environmental Geochemistry of Coastal Lagoon Systems, Rio de Janeiro, Brazil*; KNOPPERS, B. A.; BIDONE, E. D.; ABRÃO, J. J., EDS.; UFF/FINEP: Rio de Janeiro, 1999.

BUSHNELL, M.; WORTHINGTON, H. *Manual for real-time quality control of water level data: a guide to quality control and quality assurance for water level observations. Version 2.1.* 2021.

FRANCO, A. A., *Marés: Fundamentos, Análise e Previsão*. DHN, 2ª edição. Niterói, 2009.

FUCHS, V.; TEIXEIRA, G.L.V.; NZUALO, T.N.M. *Estimation Of Nautical Chart Datum By The Statistical Method In Micro And Meso Tidal Regime: An Alternative To The Balay Harmonic Method. International Hydrographic Organization (IHO). The International Hydrographic Review*, v,26. 2021.

MELO Fº., E. *Maré Meteorológica na Costa Brasileira*, Tese Professor Titular, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, Abril 2017.

OTT. *Operating Instructions, Shaft Encoder with Data Logger Thalimedes. Publication number: 55.430.000.B.E 03-0398.* 2023

PUGH, D. *TIDES, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley, London*, 1987.

SILVA, G. N.; SOUZA, A. V.; PIMENTEL, V. B. *Zoneamento de maré*. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Anais Hidrográficos – TOMO LXXI. Rio de Janeiro, 2014



TAYLOR, K. E. *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*, *J. Geophys. Res.*, 106(D7), 7183– 7192, 2001. doi:10.1029/2000JD900719.

TEIXEIRA, G.L.G. *et al.* Influência dos diferentes comprimentos de séries temporais na análise harmônica da maré astronômica na Baía de Sepetiba – Rio de Janeiro, Brasil. *Anais Hidrográficos / Diretoria de Hidrografia e Navegação*, T.73, p 103- 112. 2017.

THOMSON, R.E., and EMERY, W.J. *Data Analysis Methods In Physical Oceanography*. Elsevier. 3^o edition. Oxford, 2014.





ASPECTOS GERAIS DOS CICLONES TROPICAIS E SUBTROPICAIS OCORRIDOS NA METAREA V ENTRE 2011 E 2022

Felipe Romão Sousa Correia^{1*}

Felipe Garcez de Queiroz^{2*}

Pamella Sampaio Nascimento Amaro^{3*}

RESUMO

O Serviço Meteorológico Marinho brasileiro (SMM) é responsável pela identificação, monitoramento e divulgação de informes a respeito de ciclones subtropicais ou tropicais na sua área marítima de jurisdição (METAREA V). Tais sistemas possuem potencial significativo para impactar as operações costeiras e marítimas em função das condições adversas de tempo e mar que podem ocasionar. Desta forma, o entendimento e acompanhamento de fenômenos desta natureza são fundamentais para a salvaguarda da vida humana no mar. Atualmente, o SMM produz relatórios pós-eventos, reunindo as principais características e o histórico destes tipos de ciclones. O objetivo deste trabalho é apresentar uma compilação dos aspectos gerais e estatísticos dos ciclones subtropicais e tropicais ocorridos na METAREA V no período entre 2011 e 2022, tomando como base os dados e os relatórios disponibilizados pelo SMM.

¹ Oficial do Quadro Técnico, Meteorologista e Mestre em Meteorologia pela UFRJ. Ajudante da Seção de Previsão do CHM. Email: romao@marinha.mil.br

² Praça Especializada, Graduando em Meteorologia pela UFRJ. Auxiliar da Seção de Previsão do CHM. Email: garcez.felipe@marinha.mil.br

³ Praça Especializada Graduanda em Meteorologia pela UFRJ. Auxiliar da Seção de Previsão do CHM. Email: pamella.amaro@marinha.mil.br

Palavras-chave: Ciclone subtropical; Ciclone tropical; Serviço Meteorológico Marinho.

Keywords: Subtropical cyclone; Tropical cyclone; Marine Meteorological Service.

ABSTRACT

The Brazilian Marine Meteorological Service (MMS) is responsible for identifying, monitoring and reporting on subtropical or tropical cyclones in its maritime area of jurisdiction (METAREA V). Such systems have significant potential to impact coastal and marine operations due to the adverse weather and sea conditions they may cause. In this way, understanding and monitoring phenomena of this nature are fundamental for safeguarding human life at sea. Currently, the MMS produces post-event reports, gathering the main characteristics and history of these types of cyclones. This work aims to present a compilation of the general and statistical aspects of the subtropical and tropical cyclones that occurred in METAREA V between 2011 and 2022, based on the data and reports provided by MMS.

1. INTRODUÇÃO

O Serviço Meteorológico Marinho brasileiro (SMM), operado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), da Marinha do Brasil (MB), é o setor cuja atribuição é produzir boletins e informes meteoceanográficos para a área marítima de responsabilidade do Brasil, conhecida como METAREA V (Figura 1). Tal região é delimitada pelos paralelos de 35°50'S e 7°N, pelo meridiano de 020°W a leste e pela linha de costa brasileira, a oeste. Com o intuito de dar maior detalhamento aos informes produzidos, a METAREA V foi subdividida em subáreas, a saber:

Costeiras: ALFA (A), BRAVO (B), CHARLIE (C), DELTA (D), ECHO (E), FOXTROT (F), GOLF (G) e HOTEL (H).

Oceânicas: SUL OCEÂNICA (S) e NORTE OCEÂNICA (N).

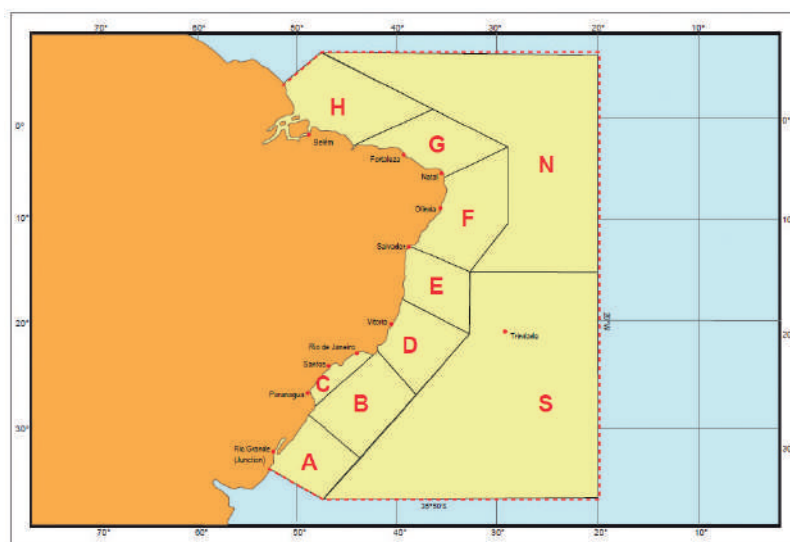


Figura 1 – Área marítima de responsabilidade brasileira para fins de emissão de informes e boletins meteoceanográficos e suas subdivisões. Fonte: NORMAM-19 (2022)



O SMM surgiu por força de atribuições legais, nacionais e internacionais, que serão discutidas com maiores detalhes nas seções a seguir. É válido ressaltar que o fornecimento de informes meteoceanográficos destina-se a embarcações de quaisquer bandeiras e para as mais diversas atividades fins, como: operações militares, tráfego comercial, atividades de esporte e recreio e transporte coletivo.

A necessidade do constante monitoramento das condições atmosféricas e oceânicas dá ao SMM um caráter ininterrupto de funcionamento. Com isso, logra-se alertar, sempre que necessário, a comunidade e as embarcações sobre os riscos envolvidos nas mais diversas atividades mediante a iminência ou ocorrência de fenômenos meteorológicos que podem ocasionar baixa visibilidade, rajadas de vento intenso, mar agitado e ressaca. Tais situações configuram avisos de mau tempo.

A maior parte dos avisos de mau tempo divulgados pelo SMM está relacionada a eventos de escala sinótica e, principalmente, à atuação de ciclones extratropicais, ou seja, centros de baixa pressão associados aos sistemas frontais. Esses fenômenos ocorrem durante todo o ano, com variações sazonais em seu deslocamento, atingindo latitudes menores durante o período do outono-inverno.

Contudo, há uma classe específica de avisos de mau tempo que são utilizados para alertar sobre a possibilidade de formação ou iminência de um ciclone com características subtropicais ou tropicais na METAREA V. Tais informes são denominados avisos de mau tempo especiais, ou simplesmente avisos especiais. Nestes

avisos constam a localização atual e posições prognosticadas para a evolução do ciclone, valor central da pressão atmosférica, subáreas afetadas e características de vento e mar associados, conforme preconizado pela NORMAM-19 (2022). A emissão dos avisos especiais ocorre em função da baixa frequência destes tipos de ciclones no oceano Atlântico Sul (Gozzo, 2014). Além disso, a MB como órgão oficial responsável, ao emitir o aviso especial, cumpre seu papel de ser referência nas informações oficiais sobre o fenômeno, contribuindo assim para que a mídia veicule matérias com dados precisos e para que não haja confusão destes com os sistemas frontais que são mais frequentes.

No intuito de fomentar estudos sobre a ocorrência de tais ciclones na METAREA V, bem como manter um registro histórico do monitoramento, o SMM disponibiliza relatórios pós-eventos relativos aos fenômenos ocorridos a partir de 2011. Estes documentos perfazem uma compilação das informações oficiais divulgadas pelo SMM, tais como avisos especiais, notas à imprensa, posicionamento e trajetória (provenientes da carta sinótica); e também de dados estimados e/ou observados de variáveis meteoceanográficas que caracterizem o ciclone, tais como pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, altura de onda e temperatura da superfície do mar (TSM).

Além disso, é possível correlacionar tais informações com as fases do El Niño Oscilação Sul (ENOS), de modo a obter uma caracterização climatológica de sistemas subtropicais e tropicais. Com base nessa argumentação, o objetivo deste

trabalho é utilizar as informações dos relatórios pós-evento para compilar aspectos gerais e estatísticos dos ciclones subtropicais e tropicais ocorridos na METAREA V no período entre 2011 e 2022.

2. CICLONES SUBTROPICAIS E TROPICAIS

2.1. Definição

De maneira geral, o termo “ciclone” é utilizado para identificar sistemas de baixa pressão atmosférica que, no hemisfério sul, são caracterizados pelo giro do vento no sentido horário no entorno destes sistemas. A caracterização das fases de ciclones depende do perfil vertical de temperatura encontrado a partir do núcleo do sistema em superfície.

Ciclones tropicais são caracterizados por núcleo quente e profundo em águas tropicais ou subtropicais (MATHIAS, 2012), não estão associados a sistemas frontais e possuem convecção profunda e organizada, além do vento apresentando circulação fechada na superfície fechada, em torno de um centro bem definido. Já os subtropicais possuem núcleo quente em baixos níveis da troposfera, sobrepostos por um núcleo mais frio na alta troposfera (GOZZO, 2014; DA ROCHA *et al.*, 2019; MATHIAS *et al.*, 2022). Os ciclones subtropicais apresentam ventos mais intensos a uma distância a cerca de 110 km do centro do sistema (NORMAM-19, 2022), campo de espessura menos simétrico, mais cisalhamento vertical do vento e atividade convectiva mais esparsa do que os ciclones tropicais.

Um ciclone subtropical ou tropical é classificado de acordo com a intensidade do vento como Depressão, quando a velocidade do vento próxima ao centro é igual ou inferior a 33 nós, e passa a ser denominado como Tempestade quando o vento atinge 34 nós de intensidade, recebendo um nome, conforme listagem prévia constante na NORMAM-19 (2022) para ciclogêneses dentro da METAREA V. No caso específico de Tempestades Tropicais (TT), quando o vento ultrapassa 64 nós, a TT passa a ser chamada de Furacão. Não há registros de Tempestades Subtropicais (TS) que tenham atingido ou superado 64 nós.

2.2. Identificação operacional

A detecção de centros de baixa pressão em ambiente operacional, ou seja, em serviços meteorológicos, é feita com base no campo de pressão ao nível médio do mar. Este campo é obtido a partir da análise de dados observados de estações e boias meteoceanográficas que resultam em isóbaras (linhas de igual valor de pressão atmosférica) nas cartas sinóticas de superfície, ou é proveniente de prognóstico de modelos numéricos de previsão do tempo para um horário especificado.

Contudo, para a classificação de ciclones subtropicais e tropicais devem ser analisadas ferramentas numéricas que auxiliem a identificação do perfil vertical de temperatura e da variação do vento ao redor do núcleo do ciclone.

Hart (2003) desenvolveu uma ferramenta conhecida como diagrama de fases, que utiliza prognósticos de modelos



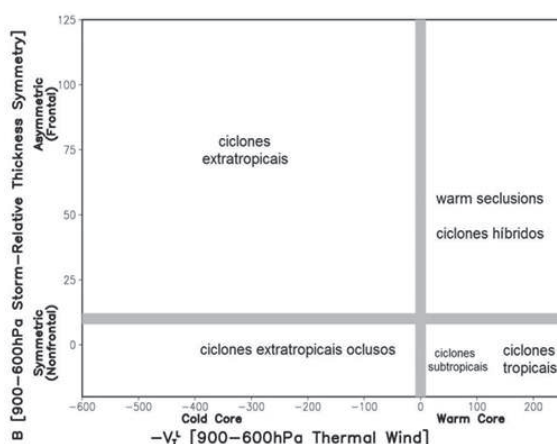
numéricos para avaliar o perfil vertical de temperatura e vento dos ciclones. Recentemente, os estudos de Mathias *et al.* (2022) apresentam exemplos de classificações de ciclones com base nos diagramas de fase para fins operacionais.

A Figura 2 indica os parâmetros necessários para definir a temperatura do núcleo e a simetria do campo de espessura do ciclone. Os parâmetros avaliados indicam a simetria do ciclone entre 600 e 900 hPa (B); o vento térmico em baixos níveis, representado pela camada entre 600 e 900 hPa ($-V_T^L$); e o vento térmico em altos níveis, representado pela camada entre 600 e 300 hPa ($-V_T^U$). É possível verificar que ciclones subtropicais devem possuir simetria vertical ($B \cong 0$), ou seja, apresentar barotropia na baixa troposfera, núcleo quente em baixos níveis ($-V_T^L > 0$) e frio em altos níveis ($-V_T^U < 0$). Ao passo que ciclones tropicais são caracterizados

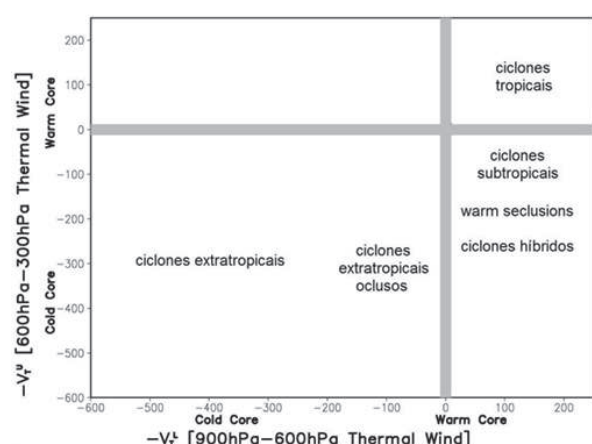
também por elevada barotropia ($B \cong 0$), mas possuem um núcleo quente que se estende por toda a troposfera ($-V_T^L > 0$ e $-V_T^U > 0$).

Para exemplificar a utilização operacional de tal ferramenta, são apresentados diagramas de fase disponibilizados pela *Florida State University* (FSU) para a TT Iba (Figura 3), ocorrida em março de 2019, e para a TS Yakecan (Figura 4), ocorrida em maio de 2022. Os diagramas de fase são aqueles definidos por Hart (2003) e apresentam a evolução temporal dos ciclones ao longo de seu ciclo de vida. O ciclone Iba inicia como um sistema simétrico (Fig. 3a) com núcleo quente e profundo (Fig. 3a e 3b).

Já o ciclone Yakecan ganha simetria ao longo do dia 17 (Fig. 4a), quando passa a ser classificado como subtropical, possuindo núcleo quente em baixos níveis e frio em altos níveis (Fig. 4a e 4b).



a)



b)

Figura 2 – Desenho esquemático de um diagrama de fases mostrando as possíveis classificações que um ciclone pode receber, utilizando os parâmetros (a) B e $-V_T^L$ e (b) $-V_T^L$ e $-V_T^U$. Fonte: Hart (2003), adaptado por Mathias (2012)

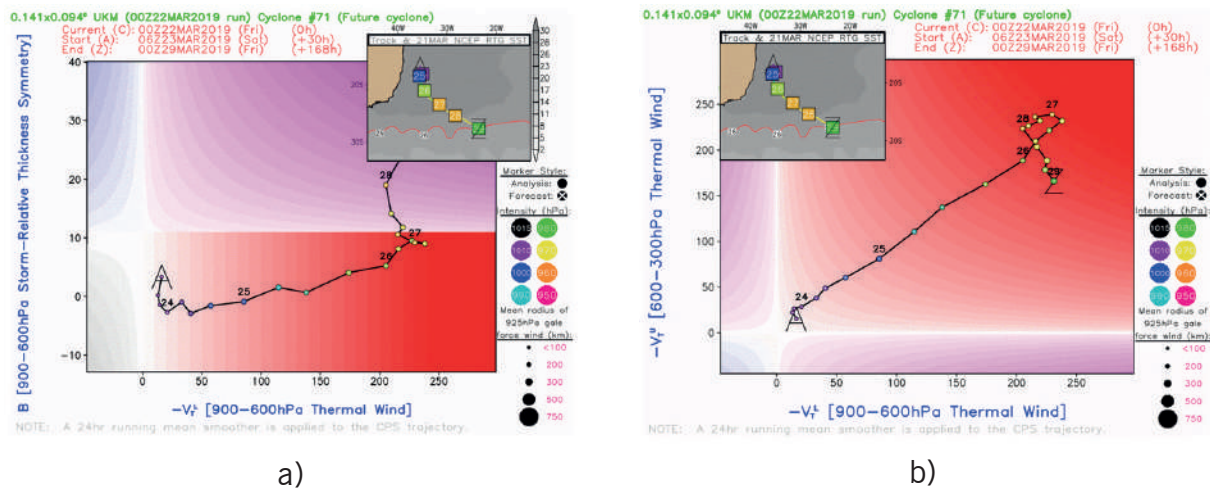


Figura 3 – Diagrama de fase de 00Z do dia 22MAR2019 do modelo numérico de previsão do tempo UKMET referente ao centro de baixa pressão associado ao ciclone tropical Iba com avaliação dos parâmetros (a) B e $-V_T^L$ e (b) $-V_T^L$ e $-V_T^U > 0$). Fonte: FSU

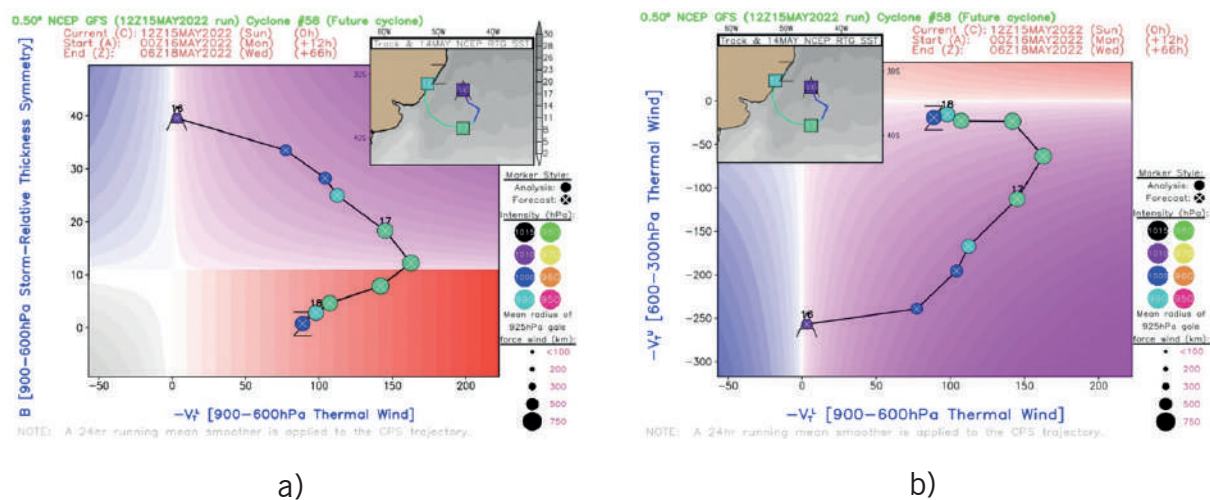


Figura 4 – Diagrama de fase de 12Z do dia 15MAI2022 do modelo numérico de previsão do tempo GFS referente ao centro de baixa pressão associado ao ciclone subtropical Yakecan com avaliação dos parâmetros (a) B e $-V_T^L$ e (b) $-V_T^L$ e $-V_T^U > 0$). Fonte: FSU

Após a identificação da natureza do sistema, a velocidade do vento no entorno do ciclone é estimada através de sensores encontrados a bordo de satélites de órbita polar, conhecidos como escaterômetros. Tais sensores estimam a velocidade e direção do vento com base na rugosidade da superfície do mar. Um exemplo da utilização prática dos escaterômetros pode ser visto através da passagem do satélite METOP-C que capturou a TS Raoni, em

junho de 2021 (Figura 5a). É possível notar que, no momento da passagem do satélite, Raoni apresentava ventos de cerca de 50 nós no setor sudoeste. Além dos escaterômetros, é comum utilizar estimativas da velocidade do vento oriundas de outro sensor satelital: o radiômetro. Um exemplo deste produto aparece na Figura 5b, onde são encontradas velocidades de aproximadamente 50 nós na área ALFA, na tarde do dia 29 de junho 2021, também associadas a TS Raoni.

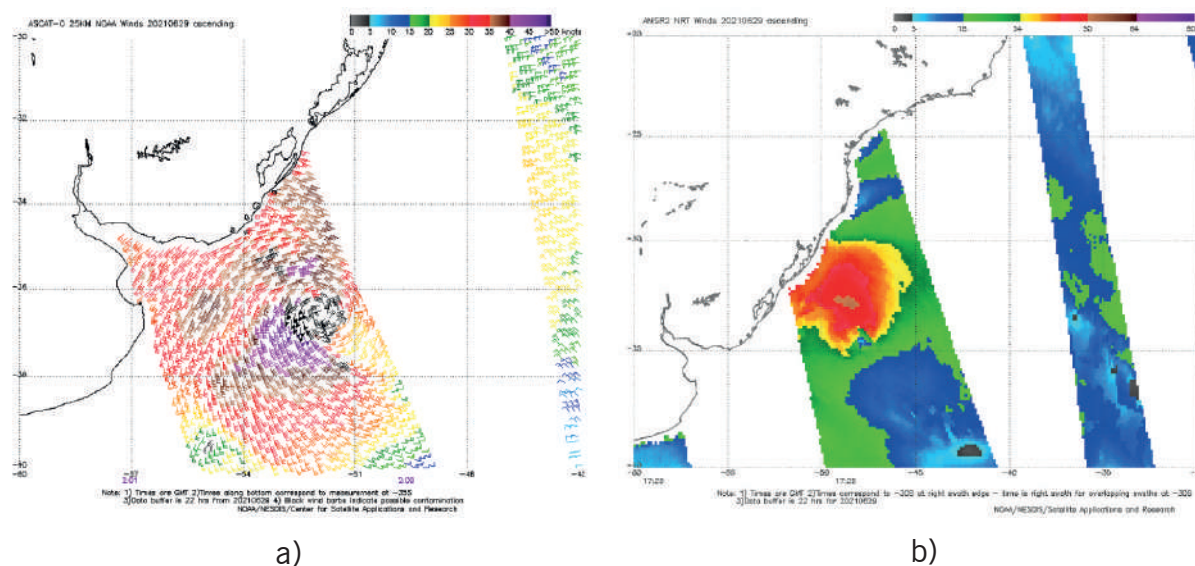


Figura 5 – (a) Estimativa de direção e intensidade do vento pelo escaterômetro ASCAT do satélite METOP-C às 02:00Z do dia 29 de Junho 2021 e (b) estimativa de intensidade do vento pelo radiômetro GCOMW1 do satélite AMSR-2 às 17:25Z do dia 29 de Junho 2021. Fonte: NESDIS/NOAA

3. SERVIÇO METEOROLÓGICO MARINHO BRASILEIRO

3.1. Atribuições legais

A existência de um serviço meteorológico voltado para regiões marítimas é uma das responsabilidades provenientes da assinatura conjunta de diversos países durante a Convenção Internacional para Salvaguarda da Vida Humana no Mar (SOLAS, 1974), sendo o Brasil um dos governos contratantes. Conforme as orientações no âmbito da Segurança da Navegação para serviços e avisos meteorológicos, o Brasil se compromete a manter um serviço meteorológico ininterrupto voltado à sua área marítima de jurisdição. As diretrizes específicas para manutenção e operação destes tipos de serviço constam no Manual de Serviços Meteorológicos

Marinhos da Organização Meteorológica Mundial (WMO-558, 2018).

O comprometimento internacional do Brasil refletiu-se em âmbito nacional através do Decreto Nacional nº. 92.610/1986, que promulga o Protocolo de 1978 relativo à SOLAS de 1974. Por conseguinte, a atribuição de gerenciar um serviço meteorológico marinho coube à Marinha do Brasil em função do Decreto Nacional nº. 7.092/1972, que já atribuía a esta Força Armada a “Supervisão, orientação, pesquisa e desenvolvimento das atividades concernentes à meteorologia marinha”. O Centro de Hidrografia da Marinha insere-se nesse contexto como órgão de operacionalização do SMM como subdelegação de competência da Diretoria de Hidrografia e Navegação, exercendo assim as atribuições relativas a representação da Autoridade Marítima Brasileira para a Segurança da Navegação.

3.2. Monitoramento de Ciclones Subtropicais e Tropicais

O advento do ciclone Catarina, ocorrido em março de 2004, quebrou o paradigma de que não ocorriam ciclones tropicais no oceano Atlântico Sul. Na época, não havia ainda procedimentos padronizados em relação às medidas que deveriam ser tomadas mediante um fenômeno dessa natureza, por parte do SMM. Contudo, foram emitidos, à época, avisos de vento, mar e ressaca que orientassem a população e embarcações sobre as condições adversas.

Mais tarde, em maio de 2008, aconteceu no Rio de Janeiro/RJ o Encontro Internacional de Ciclones do Atlântico Sul, onde pesquisadores nacionais e internacionais uniram-se ao setor operacional para ampliar conhecimentos sobre o assunto, trazendo ferramentas que auxiliassem a previsão de ciclones. Neste evento foi apresentado o conceito de Diagrama de Fases, já discutido neste trabalho como de suma importância para avaliar a natureza do ciclone.

Em março de 2010, o oceano Atlântico Sul apresentou condições dinâmicas e termodinâmicas favoráveis à ocorrência do ciclone Anita. O ciclone recebeu este nome em homenagem à Anita Garibaldi, em função de sua formação próxima ao litoral de Santa Catarina, cidade natal da líder revolucionária.

Fruto da necessidade de identificar e monitorar a gênese e evolução de ciclones subtropicais e tropicais, além de padronizar os critérios para atribuição de nomes às tempestades, surge a publicação

naval NORMAM-19 (Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima). Tal documentação dita, dentre outros assuntos, as diretrizes que orientam as ações que devem ser tomadas em relação a ciclones tropicais e subtropicais na METAREA V, bem como os nomes de origem indígena que devem ser atribuídos aos sistemas que atingirem a classificação de tempestade. Portanto, foi estabelecido que a nomenclatura oficial é de responsabilidade da MB, em função de sua jurisdição sobre a METAREA V. Além disso, conforme já mencionado, a adoção de um nome facilita a divulgação de informações sobre o sistema tanto pelo SMM quanto nos veículos de mídia.

O detalhamento dos procedimentos operacionais para monitoramento de ciclones subtropicais e tropicais na METAREA V pelo SMM está definido em 5 etapas, como ilustrado no fluxograma da Figura 6. A identificação de ciclones ocorre com base nos prognósticos de modelos numéricos globais e regionais de previsão do tempo, de fonte externa ou processados pelo CHM. Em seguida, avalia-se as características do tipo de núcleo do ciclone com auxílio dos diagramas de fase e as condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento do sistema, como o campo de TSM e os padrões da dinâmica troposférica. Ainda nesta etapa, verifica-se se há persistência nas previsões subsequentes dos modelos numéricos, mantendo o sistema com características subtropicais ou tropicais. De modo a equalizar a informação divulgada, são realizados contatos laterais com centros meteorológicos operacionais nacionais, a



Figura 6 – Fluxograma de ações a serem tomadas pelo SMM mediante iminência ou prognóstico de formação de sistemas subtropicais ou tropicais na METAREA V

exemplo do Centro Integrado de Meteorologia Aeronáutica (CIMAER), do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE); e internacionais, a exemplo do *Weather Prediction Center* (WPC) e do *National Hurricane Center* (NHC). Ato contínuo, a divulgação ocorre por meio da emissão do aviso especial, da plotagem do sistema na carta sinótica e do detalhamento das informações técnicas nas notas à imprensa.

4. METODOLOGIA E DADOS

4.1. Relatórios pós-eventos e fonte de dados

Os relatórios pós-eventos gerados pelo SMM foram utilizados como fonte para o presente estudo. Tais documentos utilizam como base dados e informações de origem interna, sendo estes gerados pelo SMM (cartas sinóticas, avisos de mau tempo, trajetória estimada e notas oficiais conjunta à imprensa), e externa, como imagens de satélite de órbita polar e geostacionários, ferramentas operacionais derivadas de modelos numéricos

de previsão do tempo (diagramas de fase), estimativas de sensores satelitais para obtenção da direção e velocidade do vento, altura da onda e TSM.

A documentação dos relatórios pós-evento apresenta uma estrutura uniforme que permite identificar as principais características de cada ciclone, possibilitando a comparação entre eles. Podem ser observados os seguintes elementos:

- Ficha-resumo – classificação alcançada; período de atuação e duração com base nas cartas sinóticas do SMM; emissão do primeiro aviso de mau tempo especial; subáreas afetadas da METAREA V; direção média de deslocamento e estimativa/observação do vento máximo e da maior altura de onda.

- Análise sinótica – configuração sinótica antes, durante e logo após o decaimento do sistema, com base no sequenciamento das cartas sinóticas produzidas pelo SMM e, eventualmente, em imagens de satélites e diagramas de fase de modelos numéricos de previsão do tempo.

- Avisos de mau tempo emitidos – número, data de emissão, classificação informativa e validade do(s) aviso(s) especial(is) emitido(s).

- Notas oficiais à imprensa – relação de notas oficiais à imprensa emitidas em parceria com o CIMAER, INMET e INPE, que servem como instrumento de divulgação dos avisos especiais em decorrência da formação de ciclones subtropicais e tropicais na METAREA V, evidenciando os estados que foram alertados.

- Trajetória estimada – coordenadas geográficas da posição dos sistemas, com intervalos de 12 horas, durante o período de atuação, com base na informação da carta sinótica.

- Dados observados – registros feitos por estações meteorológicas de superfície, de aeródromo, boias meteorológicas ou reportes de navios, que estivessem localizados próximo a trajetória do ciclone e permitissem sua avaliação.

- Dados estimados – estimativas obtidas por sensores a bordo de satélites em órbita polar, tais como escaterômetros, radiômetros e altímetros, que indicam a velocidade e direção do vento e a altura da onda, respectivamente, além de TSM obtida por interpolação otimizada. Nesta seção, para os ciclones Arani, Bapo e Cari, em substituição aos altímetros, foram utilizados dados da reanálise ERA5 (HERBASCH *et al.*, 2018) para caracterizar o estado do mar.

4.2. Metodologia

Dados dos relatórios pós-evento foram analisados com foco em métricas estatísticas, de forma a evidenciar as características tanto do monitoramento do SMM quanto dos fenômenos meteorológicos. Os aspectos avaliados foram frequência de

ocorrência, ambiente sinótico no momento da formação, trajetória preferencial, mínimo de pressão atmosférica, máximos de velocidade do vento e altura das ondas e, por fim, relação com as fases positiva, negativa e neutra do ENOS.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. Características gerais

Conforme informações disponibilizadas pelo SMM, no período de 2011 a 2022 contabilizou-se a ocorrência de 5 Depressões Subtropicais (DS), 14 Tempestades Subtropicais (TS) e 1 Tempestade Tropical (TT) na METAREA V. Os respectivos períodos de atuação, duração em horas e a emissão do primeiro aviso especial constam na Tabela 1. As datas de cada evento foram compiladas tomando-se por base sua identificação na carta sinótica. A duração destes eventos variou entre 12 horas (DS#01-2014), sendo este o ciclone mais curto, até 132 horas (TS Potira), sendo este o mais longo. Cada evento durou em média 2 dias e 6 horas (54 horas).

Outra informação que consta na Tabela 1 é a data de emissão do primeiro aviso de mau tempo especial pelo SMM. Até 2016, devido a constantes mudanças de procedimentos, não havia um padrão do momento da emissão do aviso de mau tempo especial. A partir da TS Guará, em 2017, os avisos passaram a ser divulgados com antecedência a formação do sistema, inclusive este em sua fase de DS. Não se obteve registro de aviso especial em decorrência da DS#01-2016.



A TS Yakecan apresentou a emissão mais antecipada, com 56 horas de antecedência, seguida pela TS Kurumí (47 horas) e pela TS Oquirá (45 horas). A divulgação antecipada dos avisos especiais reflete diretamente a maior habilidade na previsão de tais sistemas e, por conseguinte, a maior confiabilidade na representação

das características sinóticas destes pelos modelos numéricos de previsão do tempo.

De modo a obter-se uma análise climatológica da ocorrência dos eventos, os dados da Tabela 1 foram usados para confeccionar as Figuras 7 e 8, que representam as frequências mensal e anual das perturbações atmosféricas, respectivamente.

Tabela 1 – Período de atuação, duração em horas e emissão do primeiro aviso especial das depressões subtropicais, tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridas na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: CHM/MB

Ciclone	Início	Fim	Duração (horas)	Aviso especial
TS Arani	14MAR2011 (12Z)	17MAR2011 (00Z)	60	15MAR2011 (15:00Z)
DS#01-2014	20FEV2014 (12Z)	21FEV2014 (00Z)	12	20FEV2014 (11:30Z)
DS#02-2014	27MAR2014 (12Z)	29MAR2014 (00Z)	36	27MAR2014 (14:30Z)
DS#01-2015	23JAN2015 (12Z)	24JAN2015 (12Z)	24	23JAN2015 (13:20Z)
TS Bapo	05FEV2015 (12Z)	08FEV2015 (00Z)	60	06FEV2015 (15:30Z)
TS Cari	10MAR2015 (12Z)	13MAR2015 (00Z)	60	11MAR2015 (02:00Z)
DS#01-2016	05JAN2016 (12Z)	07JAN2016 (00Z)	36	---
TS Deni	15NOV2016 (12Z)	16NOV2016 (12Z)	24	16NOV2016 (02:30Z)
TS Eçaí	05DEZ2016 (00Z)	06DEZ2016 (12Z)	36	04DEZ2016 (23:45Z)
TS Guará	09DEZ2017 (12Z)	11DEZ2017 (00Z)	36	08DEZ2017 (16:00Z)
TT Iba	23MAR2019 (12Z)	28MAR2019 (00Z)	108	21MAR2019 (20:00Z)
TS Jaguar	20MAI2019 (00Z)	22MAI2019 (00Z)	48	20MAI2019 (04:00Z)
TS Kurumí	23JAN2020 (12Z)	25JAN2020 (00Z)	36	21JAN2020 (13:00Z)
TS Mani	25OUT2020 (12Z)	27OUT2020 (12Z)	48	24OUT2020 (15:00Z)
TS Oquirá	27DEZ2020 (12Z)	30DEZ2020 (12Z)	72	25DEZ2020 (15:00Z)
DS#01-2021	14FEV2021 (12Z)	17FEV2021 (00Z)	60	14FEV2021 (14:00Z)
TS Potira	19ABR2021 (12Z)	25ABR2021 (00Z)	132	18ABR2021 (16:00Z)
TS Raoni	29JUN2021 (00Z)	01JUL2021 (12Z)	60	28JUN2021 (17:00Z)
TS Ubá	10DEZ2021 (00Z)	13DEZ2021 (00Z)	72	09DEZ2021 (16:00Z)
TS Yakecan	17MAI2022 (00Z)	19MAI2022 (12Z)	60	14MAI2022 (16:00Z)

A análise da Figura 7 permite identificar que os meses de maior frequência desses tipos de fenômenos são março e dezembro, sendo que o mês de dezembro possui a maior frequência de tempestades subtropicais enquanto que em março aparecem os três tipos de fenômenos estudados. Para o período do ano entre os meses de julho e setembro, não se observou a gênese dos referidos ciclones. Ou seja, os meses com os menores valores médios de TSM no sudoeste do oceano Atlântico Sul foram os meses sem ocorrência de sistemas subtropicais. E, embora valores altos de TSM sejam uma importante condição para a formação de ciclones tropicais (GRAY, 1979), esta condição não é um consenso para ciclones subtropicais.

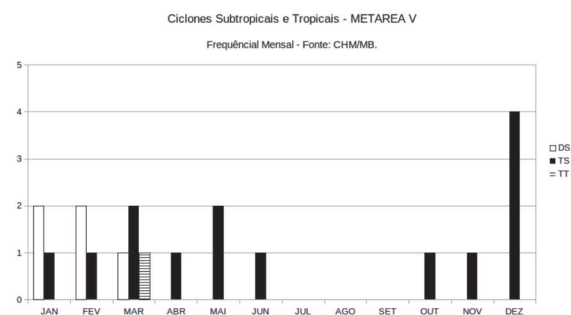


Figura 7 – Frequência mensal de ciclones tropicais e subtropicais na METAREA V entre 2011 e 2022 classificados pelo SMM, onde DS – Depressão Subtropical, TS – Tempestade Subtropical e TT – Tempestade Tropical. Fonte: CHM/MB

Conforme pode ser visualizado na Figura 8, 2021 foi o ano de maior ocorrência de sistemas subtropicais, com total de 4 eventos, sendo 1 DS e 3 TS, seguido pelo ano de 2020, com ocorrência de 3 TS. Avaliando a série temporal de ocorrências anuais, é perceptível um crescimento do

número de eventos. Contudo, a quantidade de dados não é suficiente para discutir alguma tendência climática. Além disso, o maior número de ferramentas operacionais e de critérios de classificação objetiva também permitiu mais classificações destes eventos na METAREA V.

As seções a seguir apresentam análises referentes apenas aos sistemas que atingiram a categoria de tempestade (ventos estimados ou observados acima de 33 nós).

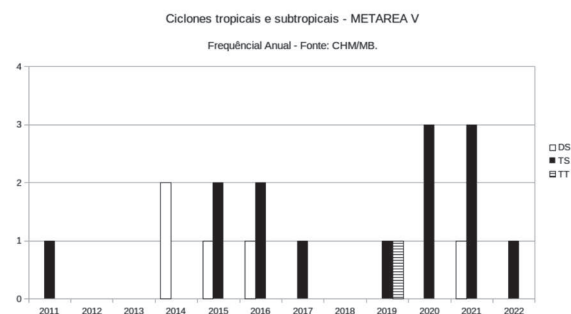


Figura 8 – Frequência anual de ciclones sub tropicais e tropicais na METAREA V entre 2011 e 2022 classificados pelo SMM, onde DS – Depressão Subtropical, TS – Tempestade Subtropical e TT – Tempestade Tropical. Fonte: CHM/MB

5.2. Ambiente sinótico de origem

Foram documentados, com base nas cartas sinóticas do SMM, os sistemas atmosféricos precursores das tempestades subtropicais e tropical. Considerou-se o fenômeno que aparecia no local de formação do ciclone na carta sinótica imediatamente anterior a formação deste. Os resultados contabilizados estão presentes na Tabela 2.



Tabela 2 – Sistema sinótico percussor das tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridas na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: CHM/MB

Baixa pressão	Cavado	Ciclone extratropical	Seclusão quente
Cari (MAR2015) Eçaí (DEZ2016) Iba (MAR2019) Kurumí (JAN2020) Oquirá (DEZ2020) Potira (ABR2021)	Bapo (FEV2015) Deni (NOV2016) Guará (DEZ2017) Jaguar (MAI2019) Mani (OUT2020)	Arani (MAR2011) Ubá (DEZ2021) Yakecan (MAI2022)	Raoni (JUN2021)

Nota-se que 5 TS (cerca de 33% do total) tiveram sua origem em sistemas de baixa pressão presentes na atmosfera, ou seja, ciclones apresentando apenas o mínimo de pressão atmosférica em torno de um núcleo com isóbara fechada e giro horário do vento. Nesta classe, encontra-se também a TT Iba.

Cavados atmosféricos (prolongamento de sistemas de baixa pressão) foram responsáveis por um terço da origem das TS entre 2011 e 2022 na METAREA V. Nesta classe encontra-se a TS Jaguar que ocorreu fora do período primavera-verão, quando ocorreram a maioria das tempestades.

A parcela menor restante das TS é originária de ciclones extratropicais. Nestes casos, ocorreu o processo de transição de fase, onde um sistema de baixa pressão, que inicialmente possuía núcleo frio, aprisionou ar quente em seu interior, dando origem a uma seclusão quente. A região do oceano Atlântico Sudoeste possui condições favoráveis a este processo, conforme mostram Oliveira (2019) e Mathias *et al.* (2022). A TS Raoni foi um dos casos cuja seclusão quente promoveu a simetria vertical, originando um sistema híbrido subtropical. Nos casos da TS Arani, Ubá e

Yakecan, sugere-se que a baixa oclusa associada ao sistema frontal fez uma rápida transição para núcleo quente, ganhando simetria vertical, em um intervalo menor do que 12 horas, espaço de tempo em que as cartas sinóticas são divulgadas.

5.3. Trajetória

A Tabela 3 representa um resumo das informações das trajetórias das tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridos na METAREA V entre 2011 e 2022. De acordo com a Tabela 3, a formação e deslocamento dos ciclones ocorreram nas subáreas ALFA, BRAVO, CHARLIE, DELTA, ECHO e SUL OCEÂNICA, abrangendo assim somente a porção sul da METAREA V. O deslocamento médio preferencial dos sistemas é para sudeste, a exceção das TS Raoni e Yakecan, que apresentaram deslocamento para nordeste. É interessante destacar que ambos os sistemas se formaram em águas mais frias e se dissiparam sobre águas mais quentes (figuras de TSM não apresentadas), indicando que o ambiente marítimo aquecido não foi um fator preponderante para a manutenção da atividade convectiva. Em relação à distância de formação da costa, a

TS Arani e a TS Jaguar formaram-se mais próximo do litoral, a cerca de 100 e 111 km, respectivamente e a TS Oquira e a TS

Yakecan formaram-se com o maior afastamento, a cerca de 1186 e 928 km, respectivamente.

Tabela 3 – Subáreas da METAREA V afetadas, direção média de deslocamento e distância de formação da costa (km) das tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridas na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: CHM/MB

Ciclone	Subáreas da METAREA V	Deslocamento médio	Distância da costa (km)
Arani	DELTA e SUL OCEÂNICA	SE	100
Bapo	ALFA, BRAVO, CHARLIE e SUL OCEÂNICA	S/SE	123
Cari	ALFA, BRAVO e SUL OCEÂNICA	SE	370
Deni	BRAVO, CHARLIE	SE	120
Eçaí	BRAVO e SUL OCEÂNICA	E	445
Guará	DELTA e SUL OCEÂNICA	SE	250
Iba	DELTA, ECHO e SUL OCEÂNICA	S	180
Jaguar	DELTA e SUL OCEÂNICA	SE	111
Kurumí	BRAVO e SUL OCEÂNICA	SW	853
Mani	DELTA	SE	169
Oquira	SUL OCEÂNICA	SW/SE	928
Potira	BRAVO, DELTA e SUL OCEÂNICA	E	553
Raoni	ALFA e BRAVO	NE	248
Ubá	SUL OCEÂNICA	SE	903
Yakecan	ALFA, BRAVO e SUL OCEÂNICA	NE	1186

A avaliação das trajetórias dos ciclones, conforme apresentada na Figura 9, a seguir, permite identificar que todos eles apresentaram tanto a ciclogênese quanto a ciclólise em algum ponto sobre a região marítima. Ademais, constatou-se que não houve passagem sobre a porção continental. A TS Raoni (2021) e a TS Yakecan (2022) foram os sistemas que se formaram mais ao sul, deslocando-se para nordeste em média. Já a TT Iba (2019) foi o ciclone que se formou mais ao norte, em um ambiente marítimo propício à sua natureza tropical, com águas superficiais do mar aquecidas, tendo deslocado-se para sul. A TS Yakecan (2022) percorreu a maior trajetória, com deslocamento de cerca de 2745 km durante as 60 horas que esteve classificada como ciclone subtropical.

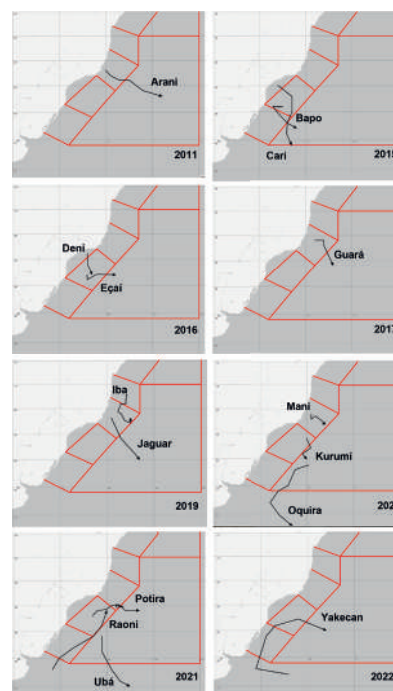


Figura 9 – Trajetórias das tempestades subtropicais e da tempestade tropical classificadas pelo SMM agrupadas por ano de ocorrência. O contorno vermelho representa as subáreas da METAREA V, conforme visto na Figura 1. Fonte: CHM/MB



5.4. Máximos observados

O grau de severidade dos ciclones subtropicais e tropicais pode ser avaliado pela ordem de grandeza das variáveis meteorológicas associadas a eles. Especificamente a velocidade do vento e a altura da onda refletem o impacto que tais fenômenos causam em seus deslocamentos. A Tabela 4 apresenta uma compilação com os valores máximos de vento e a maior altura de onda associados. Tais valores foram obtidos conforme disponibilidade de dados, sendo estimativas provenientes de sensores satelitais, como escaterômetros, radiômetros e altímetros, ou registros feitos por alguma estação terrestre, em observações para fins aeronáuticos (METAR), ou por boia meteoceanográfica.

A TT Iba mostrou-se como o fenômeno de maior grau de severidade, apresentando as maiores velocidades do vento associadas, tendo atingido 60 nós no início da madrugada do dia 25 de março de 2019, valor este obtido pelo radiômetro GCOMW1 a bordo do satélite AMSR-2. O ciclone também apresentou a maior altura de onda associada, com 8,5 metros de altura significativa no início da manhã do dia 27 de março de 2019, estimada pelo altímetro AltiKa a bordo do satélite SARAL.

A TS Cari foi o ciclone de menor intensidade do vento, com 35 nós durante a

tarde do dia 10 de março 2015, estimado pelo radiômetro GCOMW1 a bordo do satélite AMSR-2. O mesmo ciclone também apresentou a menor altura de onda associada, com 4,3 metros de altura significativa no final da manhã do dia 11 de março de 2015, estimada pelos dados da reanálise ERA5/ECMWF. Foram utilizados dados da reanálise para caracterizar as ondas durante o evento devido à falta de estimativas satelitais e boias meteoceanográficas em sua região de ocorrência. O mesmo aplicou-se às TS Arani e TS Bapo.

Cabe destacar que apenas a TS Mani teve o valor máximo da intensidade do vento registrado por uma estação meteorológica. De acordo com a Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET), a estação meteorológica localizada na plataforma P-25 Albacora (SBLB), distante cerca de 160 km do litoral norte do estado do Rio de Janeiro, registrou no início da manhã do dia 25 de outubro 2021 vento sustentado de 44 nós.

Em paralelo, apenas a TS Eçaí teve as maiores alturas de onda associadas registradas por uma boia meteoceanográfica. De acordo com os dados do Programa Nacional de Boias (PNBOIA) da MB, a boia de Santos, distante cerca de 210 km do litoral do estado de São Paulo, registrou altura significativa de 8,2 metros no final da noite do dia 4 de dezembro de 2016.



Tabela 4 – Vento máximo e maior altura de onda associados aos ciclones (valores em negrito), data-hora de ocorrência e origem da informação. Fonte: CHM/MB

Ciclone	Vento máximo (nós)	Maior altura de onda (metros)
Arani	45 15MAR2011 (20:42Z) WindSAT	4,6 16MAR2011 (19:00Z) ERA-5 (ECMWF)
Bapo	50 06FEV2015 (16:28Z) GCOMW1 (AMSR-2)	5,0 07FEV2015 (02:00Z) ERA-5 (ECMWF)
Cari	35 10MAR2015 (16:28Z) GCOMW1 (AMSR-2)	4,3 11MAR2015 (14:00Z) ERA-5 (ECMWF)
Deni	40 16NOV2016 (00:54Z) ASCAT (METOP-B)	7,8 16NOV2016 (11:33Z) JASON3
Eçaí	40 05DEZ2016 (00:07Z) ASCAT (METOP-A)	8,2 05DEZ2016 (02:00Z) PNBOIA – Santos
Guará	45 10DEZ2017 (02:50Z) GCOMW1 (AMSR-2)	5,9 11DEZ2017 (00:30Z) Sentinel-3
Iba	60 25MAR2019 (03:54Z) GCOMW1 (AMSR-2)	8,5 27MAR2019 (08:48Z) AltiKa (SARAL)
Jaguar	45 20MAI2019 (03:10Z) GCOMW1 (AMSR-2)	4,6 20MAI2019 (20:09Z) AltiKa (SARAL)
Kurumí	45 23JAN2020 (16:06Z) GCOMW1 (AMSR-2)	5,4 24JAN2020 (01:03Z) Sentinel-3
Mani	44 25OUT2020 (10:19Z) METAR (SBLB/REDEMETS)	5,2 27OUT2020 (05:13Z) JASON-3
Oqueira	40 28DEZ2020 (03:35Z) GCOMW1 (AMSR-2)	4,9 28DEZ2020 (12:30Z) Sentinel-3
Potira	45 21ABR2021 (22:21Z) ASCAT (METOP-A)	8,2 20ABR2021 (07:33Z) JASON3
Raoni	50 29JUN2021 (02:00Z) ASCAT (METOP-C)	7,3 29JUN2021 (17:46Z) JASON3
Ubá	40 10DEZ2021 (01:14Z) ASCAT (METOP-B)	4,7 10DEZ2021 (12:33Z) Sentinel-3
Yakecan	55 18MAI2022 (04:13Z) GCOMW1 (AMSR-2)	7,3 17MAI2022 (18:20Z) CryoSat

5.5. TSM

A análise dos valores de TSM na região de formação de ciclones é importante para avaliar a contribuição do oceano na atividade convectiva dos sistemas meteorológicos, através da liberação de

calor latente do processo de evaporação que contribui para a formação de nuvens de chuva. A Tabela 5 apresenta o valor médio da TSM e o sinal da anomalia na região de formação do ciclone durante seu período de atuação. É possível notar que há ciclones subtropicais formando-se



tanto em ambientes relativamente frios, como foi o caso da TS Raoni (16,5°C), quanto em ambientes de águas quentes, como é o caso das TS Arani, Bapo, Cari e Jaguar (26,5°C). Por outro lado, não há um padrão no sinal de anomalia, existindo ciclones formando-se tanto em águas anormalmente aquecidas ou menos resfriadas (sinal positivo) quanto em águas anormalmente resfriadas ou menos aquecidas (sinal negativo), embora, no caso das duas tempestades que se formaram com TSM inferior a 20°C, o sinal de anomalia é positivo.

Ainda em relação a Tabela 5, dos três ciclones que se formaram fora do período primavera-verão, apenas a TS Jaguar apresentou valores elevados de TSM, equivalentes ao limiar para a formação de ciclones tropicais, tendo sido

observado 26,5°C e águas anormalmente quentes na sua região de formação. Já a TS Raoni e a TS Yakecan apresentaram, respectivamente, valores de 16,5 e 18,5°C e águas também anormalmente quentes. O contraste significativo de valores de TSM entre estes ciclones subtropicais corrobora as diferentes condições sinóticas que os originaram.

O mínimo observado de TSM em relação aos sistemas ocorreu durante a TS Raoni. A Figura 10 apresenta a distribuição horizontal dos valores médios de TSM (hachurado) e anomalias (isolinhas) no período de 28 de junho a 1^o de julho de 2021. Mesmo a trajetória da TS Raoni levando o sistema para latitudes menores e, por conseguinte, de águas mais quentes, tal fato não foi suficiente para manter a convecção do sistema organizada.

Tabela 5 – TSM e sinal da anomalia de TSM na região de formação das tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridas na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: OISST/NOAA

Ciclone	Ocorrência	TSM (°C)	Sinal da anomalia de TSM
Arani	MAR2011	26,5	-
Bapo	FEV2015	26,5	+
Cari	MAR2015	26,5	+
Deni	NOV2016	22,5	-
Eçaí	DEZ2016	22,5	-
Guará	DEZ2017	25	-
Iba	MAR2019	29	+
Jaguar	MAI2019	26,5	+
Kurumí	JAN2020	25,5	-
Mani	OUT2020	25	+
Oquira	DEZ2020	23	+
Potira	ABR2021	25,5	+
Raoni	JUN2021	16,5	+
Ubá	DEZ2021	20,5	-
Yakecan	MAI2022	18,5	+

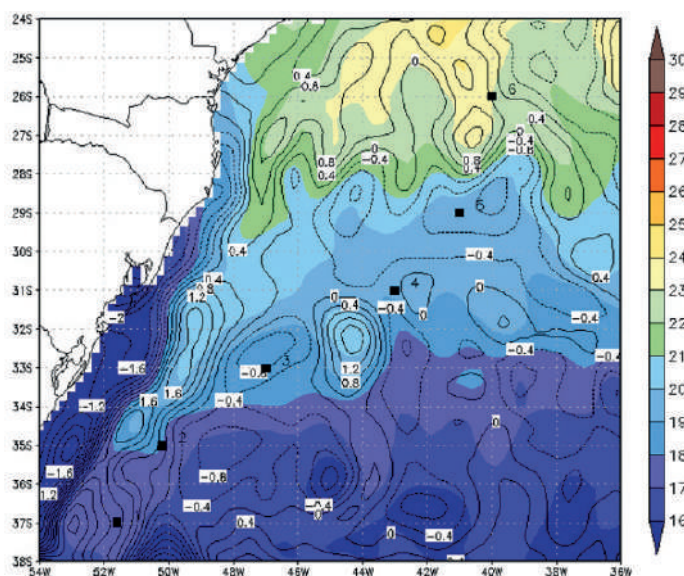


Figura 10 – Médias de TSM (hachurado) e sua anomalia (isolinhas) no período de 28JUN A 01JUL2021. Os pontos correspondem às posições centrais da TS Raoni nos seguintes dias: 1 – 29JUN (00Z); 2 – 29JUN (12Z); 3 – 30JUN (00Z); 4 – 30JUN (12Z); 5 – 01JUL (00Z); 6 – 01JUL (12Z). Fonte: OISST/NOAA

No único caso de ciclone tropical (TT Iba) registrado na METAREA V no período de estudo, verificou-se valores de 29,0°C na região de formação do sistema, com anomalias positivas de cerca de 1,0°C, conforme pode ser visto na Figura

11. O valor encontrado é superior ao limiar de 26,5°C necessário para a formação de ciclones tropicais, evidenciando que a região apresentava água superficial suficientemente quente para a gênese deste tipo de fenômeno.

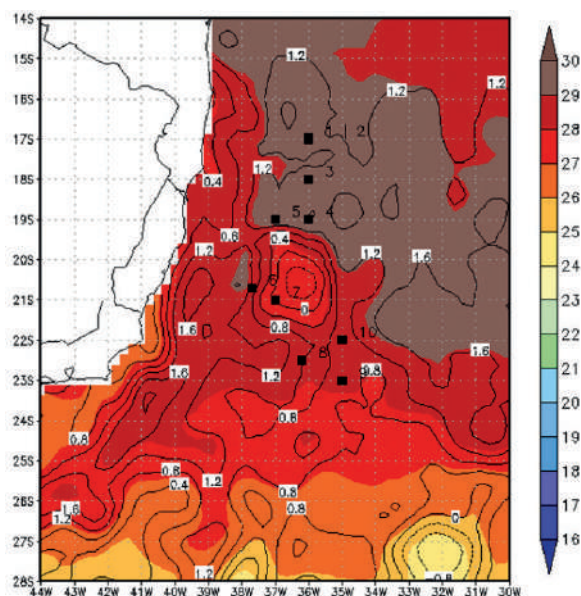


Figura 11 – Médias de TSM (hachurado) e sua anomalia (isolinhas) no período de 22 a 28MAR2019. Os pontos correspondem às posições centrais da TT Iba nos seguintes dias: 1 – 23MAR (12Z); 2 – 24MAR (00Z); 3 – 24MAR (12Z); 4 – 25MAR (00Z); 5 – 25MAR (12Z); 6 – 26MAR (00Z); 7 – 26MAR (12Z); 8 – 27MAR (00Z); 9 – 27MAR (12Z); 10 – 28MAR (00Z). Fonte: OISST/NOAA



5.6. Influência do ENOS

Avaliou-se o sinal do Índice Niño Oceânico (INO), de modo a verificar sua fase durante a ocorrência das tempestades subtropicais e da tempestade tropical. Este índice consiste na média de 3 meses das anomalias de TSM na região *Niño* 3.4 (05°N–05°S e 120°W–170°W) e é representativo do modo de variabilidade climática interanual conhecido como *El Niño* Oscilação Sul (ENOS).

De acordo com a Tabela 6, dos 15 eventos, a maioria (9) ocorreu em fases negativas do ENOS, ou seja, durante episódios de *La Niña*, onde o oceano Pacífico central está mais resfriado que a média. Apenas 4 eventos ocorreram durante episódios de *El Niño*, quando o oceano Pacífico central está anormalmente aquecido, e 2 durante a fase neutra, ou seja, quando os valores de TSM encontram-se dentro da média climatológica. O episódio de *El Niño* mais intenso dentre os eventos selecionados foi observado durante março de 2019, mês de ocorrência da TT Iba. Já os de *La Niña* aconteceram no último trimestre de 2020, com ocorrência da TS Mani (outubro) e TS Oquirá (dezembro).

Tabela 6 – Valores mensais do Índice Niño Oceânico (INO) para os meses das tempestades subtropicais e da tempestade tropical ocorridas na METAREA V entre 2011 e 2022. Fonte: CPC/NCEP/NOAA

Ciclone	Período	INO	Fase do ENOS
Arani	MAR2011	-0,9	La niña
Bapo	FEV2015	0,5	El niño
Cari	MAR2015	0,5	El niño
Deni	NOV2016	-0,7	La niña
Eçaí	DEZ2016	-0,6	La niña
Guará	DEZ2017	-1,0	La niña
Iba	MAR2019	0,7	El niño
Jaguar	MAI2019	0,5	El niño
Kurumí	JAN2020	0,5	Neutra
Mani	OUT2020	-1,2	La niña
Oquirá	DEZ2020	-1,2	La niña
Potira	ABR2021	-0,7	La niña
Raoni	JUN2021	-0,4	Neutra
Ubá	DEZ2021	-1,0	La niña
Yakecan	MAI2022	-1,0	La niña

De maneira similar ao comportamento da TSM, nota-se que há ocorrência dos eventos tanto na fase negativa quanto na positiva e neutra do ENOS. Desta forma, não foi possível estabelecer uma relação direta entre a ciclogênese subtropical, na METAREA V, com os eventos de ENOS.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentadas compilações estatísticas sobre a ocorrência de ciclones subtropicais e tropicais na METAREA V,

realizadas pelo SMM, com base no período de 2011 a 2022. Os resultados apontam para uma clara evolução nos procedimentos operacionais de monitoramento de tais eventos, destacando-se a maior disponibilidade de dados de escaterômetros, que são fundamentais para estimar a velocidade do vento e, por conseguinte, classificá-los; e dos diagramas de fase de modelos numéricos de previsão do tempo, que permitem avaliar o perfil térmico vertical. Observa-se também um ganho de expertise em tal prática operacional refletido através da maior antecedência de emissão do primeiro aviso especial.

Contabilizou-se a ocorrência de 20 eventos, sendo 1 TT, 14 TS e 5 DS, com duração variando de 12 a 132 horas. Os meses de março e dezembro apresentaram maior atividade de fenômenos desta natureza, com 4 eventos em cada mês. O ambiente sinótico que deu origem ao maior número de tempestades foi aquele onde havia um sistema de baixa pressão simples (não extratropical). A maior parte das tempestades tem deslocamento médio preferencial para sudeste e origina-se sobre a porção sul da METAREA V, com atuação mais frequente sobre as subáreas BRAVO e SUL OCEÂNICA.

A TT Iba foi o único ciclone tropical registrado no período, com velocidade do vento de 60 nós e ondas de 8,5 metros de altura significativa. A TS Yakecan apresentou a maior intensidade do vento dentre as tempestades subtropicais, com estimativa de 55 nós, ao passo que a TS Eçaí e a TS Potira apresentaram as maiores alturas de onda, com valores de 8,2 metros em ambas.

Em relação a TSM, a TT Iba formou-se sobre águas anormalmente aquecidas, com valores absolutos de até 29,0°C. Contudo, não há um padrão no sinal de anomalia e dos valores absolutos quando se trata de TS, existindo ciclones formando-se tanto em águas anormalmente aquecidas quanto em águas anormalmente resfriadas (sinal negativo). A inserção de ar quente em baixos níveis, no caso de ciclones subtropicais, servem para caracterizá-lo e diferenciá-lo dos demais tipos existentes na natureza. Sugere-se que estudos mais aprofundados investiguem a contribuição da advecção de ar quente e de fluxos verticais locais de calor sensível na formação e manutenção de ciclones subtropicais, em acréscimo a liberação de calor latente observada no aquecimento superficial da água do mar.

Notou-se ainda que tempestades subtropicais se formam nas fases negativa, neutra e positiva do ENOS, sem preferência significativa (apesar de maior frequência em episódios frios). Com isso, não há indícios para afirmar categoricamente que a ciclogênese subtropical é favorecida pela fase do ENOS vigente.

O advento da conceituação de ciclones subtropicais, aliado à operacionalização de ferramentas numéricas que avaliem o sistema permite que períodos pretéritos sejam revisitados, de modo a verificar se a ocorrência de sistemas de baixa pressão (frontais ou não), não mereciam obter a classificação subtropical. Desta forma, ter-se-ia um panorama maior a respeito da climatologia de tais fenômenos no Atlântico Sul.

Por fim, o maior registro oriundos de estimativas satelitais de máximos de



velocidade do vento e altura de onda, associados aos ciclones subtropicais e tropicais, denota a escassez da observação meteoceanográfica *in loco* na METAREA V. Sugere-se que sejam criadas rotinas

operacionais de identificação rápida dos valores de pressão atmosférica, velocidade do vento e altura de onda estimados de modo a viabilizar tomadas de decisões cada vez mais rápidas por parte do previsor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Decreto nº 92.610, de 02 de maio de 1986. Promulga o Protocolo de 1978 relativo à Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar de 1974. Diário Oficial da União, Brasília, p. 6379, 05 mai. 1986. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/1985-1987/d92610.htm>. Acesso em: 26 Abr. 2023.

_____. Decreto nº 7.092, de 02 de fevereiro de 1972. Inclui nas atribuições dos Ministérios da Marinha e da Aeronáutica, as atividades de meteorologia marítima e aeronáutica, respectivamente, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Seção 1, Brasília, p. 1034, 03 fev. 1972. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-70092-2-fevereiro-1972-418665-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 26 Abr. 2023.

DA ROCHA, R. *et al.* *Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. Annals of the New York Academy of Sciences.* v. 1436, p. 138-156, Jan. 2019.

DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. Normas da Autoridade Marítima para as Atividades de Meteorologia Marítima - NORMAM-19 (2ª Rev), 2022. Niterói, 2022. Disponível em <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAM-19-DHN-2a-Rev-2022.pdf>>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

GOZZO, L. F. *Ciclones Subtropicais sobre o Sudoeste do Atlântico Sul: Climatologia e Fontes de Umidade.* 2014. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

GRAY, W. M. *Hurricanes: their formation, structure, and likely role in the tropical cyclone. Meteorology over the Tropical Oceans.* D. B. Shaw, Ed., Roy. Meteor. Soc., 155-218, 1979.

HART, R. E. *A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. Monthly Weather Review,* v. 131, p. 585-616, 2003.



HERSBACH, H. *et al.* ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2018.

HULME, A.; MARTIN, J. *Synoptic- and Frontal-Scale Influences on Tropical Transition Events in the Atlantic Basin. Part I: A Six-Case Survey.* *Monthly Weather Review*, v. 137, p. 3605-3625, 2009.

IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974/1988, Londres, Inglaterra, 01/11/1974.* Disponível em: <<https://www.ccaimo.mar.mil.br/ccaimo/solas>>. Acesso em: 27 Abr. 2023.

MATHIAS, R. S. B. *et al.* Análise de dois ciclones extratropicais de desenvolvimento explosivo no Atlântico Sul utilizando o modelo conceitual de Shapiro-Keyser. *Anais Hidrográficos*, v. 78, p. 151-173, 2022.

MATHIAS, R. S. B. Análise e Classificação de Ciclones Utilizando Diagramas de Fase: Conceitos e Aplicação em Previsão de Tempo Operacional. 2012. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, J. T. *Extratropical Transition of Subtropical Cyclones Over Southwestern Atlantic Ocean.* 2019. Tese (Doutorado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

WMO - WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Manual on Marine Meteorological Services - WMO-Nº. 558, Annex VI to the WMO Technical Regulations* (Ed. 2012, atualizada em 2018). Genebra, Suíça, 2012. Disponível em: <https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=9784#.Y4J4gHbMLIU>. Acesso em: 15 Fev. 2023.





BATIMETRIA DERIVADA POR SATÉLITE BASEADA EM ABORDAGEM DE SEGMENTAÇÃO GEOGRÁFICA

Juliane Jussara Affonso

RESUMO

Uma vez que a segurança da navegação depende do conhecimento confiável das profundidades do fundo marinho, qualquer melhoria na capacidade de derivar a batimetria é de grande interesse. Ultimamente, a técnica de Batimetria Derivada de Satélite (SDB) tem sido considerada uma alternativa para o mapeamento de águas rasas, devido algumas vantagens em relação às técnicas mais comuns de levantamento. No entanto, a acurácia é consideravelmente baixa quando comparada às tecnologias convencionais de levantamento e mapeamento. Neste contexto, este trabalho apresenta uma abordagem geográfica para melhorar a estimativa da profundidade do fundo. Utilizando imagem do *Sentinel-2A* e dados de *Airborne Lidar Bathymetry (ALB)* em *St. Thomas East End Reserve (STEER)*, nas Ilhas Virgens Americanas, o resultado obtido demonstrou a capacidade de fornecer estimativas batimétricas aprimoradas em comparação às técnicas convencionais, podendo ser utilizadas para fins de cartografia náutica.

¹ Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha, Graduada em Engenharia Cartográfica pela UNESP. Mestre em Mapeamento do Oceano pela CCOM/UNH. Email: juliane.affonso@marinha.mil.br

Palavras-chave: Batimetria Derivada por Satélite; abordagem geográfica; acurácia.

ABSTRACT

Because the safety of the navigation depends on accurate knowledge of the bottom depths, any improvements in the ability to derive bathymetry are of major interest. Ultimately, due to some advantages compared with the most common techniques, Satellite-Derived Bathymetry (SDB) has been considered an alternative for mapping shallow waters. However, the accuracy is considerably low when compared to conventional surveying and mapping technologies. In this context, this work presents a geographic approach to improve bottom depth estimation. Utilizing Sentinel-2A image, Airborne Lidar Bathymetry (ALB) data, in Dry-Tortugas, in the US Virgin Islands, the result demonstrated the ability in providing improved bathymetric estimates compared to conventional techniques, which can enhance the use of satellite derived bathymetry for nautical chart purposes.

Keywords: Satellite Derived Bathymetry; geographic approach; accuracy.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

A carta náutica fornece informações importantes sobre o ambiente costeiro e marinho de modo a proporcionar uma navegação segura aos navegantes. Dentre a variedade de elementos retratados, destacam-se as sondagens, linhas de costa

e curvas de profundidade. No passado, esses elementos eram tradicionalmente desenhados à mão, demandando habilidade e tempo dos profissionais envolvidos. Os avanços na tecnologia e o aumento da produção cartográfica nos últimos anos devido à transformação da carta náutica de sua forma analógica em digital tem exigido aprimorar processos por meio da automação de rotinas na compilação das cartas, além de acesso às fontes que demandem menor tempo de produção e custo reduzido (AFFONSO, 2022).

Além das necessidades de automação, existe uma grande demanda em manter as cartas atualizadas com o levantamento constante de águas rasas e de áreas que não foram levantadas anteriormente devido a diversos fatores, como o aumento do tamanho do calado dos navios que operam em canais cada vez mais limitados (KASTRISIOS & WARE, 2022) e o esforço global para mapear os oceanos até 2030 (*Seabed 2030 Project*) (GEB-CO, 2020). Dentre as técnicas tradicionais para coleta de dados batimétricos com propósito de uso em cartas náuticas, os ecobatímetros multifeixe (MBES) e monofeixe (SBES) são os comumente empregados pela comunidade hidrográfica. Embora essas tecnologias possam coletar profundidade de alta acurácia, elas apresentam algumas limitações relacionadas a custo, tempo e dificuldades de levantamento em ambientes de águas rasas.

Devido essas dificuldades, pesquisadores estudam alternativas para coleta de dado batimétrico. Neste sentido, a Batimetria Derivada de Satélite (SDB) é uma técnica econômica e promissora que utiliza



imagens ópticas de sensoriamento remoto por satélite para estimar a batimetria em áreas de águas rasas (FREIRE, 2017), que explora a física envolvida na interação dos diferentes comprimentos do espectro da luz com o fundo e coluna da água. No entanto, o SDB também apresenta algumas limitações, como a informação normalmente não poder ser obtida para além dos 30 m de profundidade e, quando comparado às técnicas convencionais de levantamento, apresenta baixa acurácia.

Apesar das limitações, trabalhos anteriores demonstraram alto potencial em estimar batimetria por imagem de satélite. No entanto, assumindo homogeneidade do fundo e da coluna d'água para toda a cena, a prática usual é adotar um modelo batimétrico global e único para toda a área. De forma a abordar áreas onde essas suposições falham, e a coluna d'água e as condições de fundo são heterogêneas, podendo vir a degradar o desempenho dos modelos globais convencionais, este trabalho apresenta uma abordagem de segmentação geográfica com o objetivo de minimizar a não uniformidade do fundo e da coluna d'água e, desta forma, melhorar a acurácia da estimativa dos dados batimétricos.

1.2. SDB

A capacidade de recuperar informações batimétricas a partir de imagens de satélite é baseada na luz solar que penetra na superfície (irradiância), percorre a coluna de água e retorna ao sensor (radiância observada). A radiação captada pelo sensor é função do comprimento de onda e da profundidade, sendo que a irradiação

decai exponencialmente com a profundidade devido a propriedades que dependem da água e seus constituintes (ASHPHAQ, 2021). Vários fatores, como a natureza do fundo, as condições atmosféricas e os parâmetros da coluna d'água atenuam o sinal e a radiância captados pelo sensor. Em condições de águas claras, comprimentos de onda mais longos do espectro visível, como o vermelho (cerca de 0,6 – 0,7 μm), são absorvidos em uma profundidade menor do que comprimentos de onda mais curtos, como o azul (cerca de 0,4 – 0,5 μm) e o verde (cerca de 0,5 – 0,6 μm), que contêm mais energia e penetram mais profundamente na água (GODWIN, 2021). De fato, de 100 a 200 metros de profundidade, praticamente toda a radiação solar é absorvida e, em algum momento, dependendo do comprimento de onda, a luz é totalmente absorvida na água.

Dentre os inúmeros métodos existentes de SDB, esse trabalho fez uso da abordagem desenvolvida por Dierssen *et al.* (2003) e que foi estendida por Freire (2017) para derivar a batimetria (z), cujo conceito baseia-se na diferença logarítmica da radiância observada de duas bandas (L_{OBS}).

$$z = m_1 \times \ln \left(\frac{L_{obs}(\lambda_i) - L_w(\lambda_i)}{L_{obs}(\lambda_j) - L_w(\lambda_j)} \right) + m_0 \quad (1)$$

Onde $L_{obs}(\lambda)$ representa a radiância observada para cada banda; m_0 , o coeficiente de translação, baseado no retorno do fundo e um coeficiente de atenuação difusa; m_1 , o coeficiente de escala baseado na atenuação difusa, e L_w representa a contribuição da coluna da água na radiância observada (PE'ERI *et al.*, 2014).

A solução do modelo ($X = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) é alcançada por meio de regressão linear, usando medições de profundidade de referência como pontos de controle. Porém, como o modelo não é linear, a solução final representa uma solução aproximada da observação, e o modelo é linearizado pela série de Taylor (FREIRE, 2017). O processo tem início com a estimativa do vetor inicial ($X_0 = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) e é repetido até que a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) seja minimizada. Neste estudo, a definição do vetor inicial foi derivada considerando a coluna d'água como zero para calcular os coeficientes m_0 e m_1 a partir de uma correlação linear entre valores de pixel da razão logarítmica e medidas de profundidade. Para obtenção dos parâmetros da coluna d'água, aplica-se a linearização do modelo e uma solução inicial é capaz de ser derivada. O vetor solução é então aplicado para cada pixel da imagem de forma a produzir uma superfície batimétrica referenciada aos pontos de controle.

1.3. SDB na cartografia náutica

A carta náutica é uma ferramenta indispensável, capaz de prover informações essenciais ao navegante, tais como profundidades, perigos à navegação, localização e característica dos sinais náuticos, informações de maré e muitos outros elementos. Sua precisão depende da confiabilidade do levantamento hidrográfico e da habilidade do cartógrafo em interpretar e compilar os dados. Para subsidiar as informações aos navegantes sobre a confiabilidade dos dados contidos

na carta, um dos elementos definidos pelo padrão S-57 da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) é a Categoria da Zona de Confiança (CATZOC), que contém especificações da acurácia das profundidades, sendo classificada em seis categorias: A1, A2, B, C, D e U (sendo A1 a mais precisa e U onde os dados ainda precisam ser avaliados) (IHO, 2002).

Atualmente, a publicação S-4 da OHI (especificação B424.7) reconhece o uso de imagens de satélite para representação de isóbatas quando não existe outra fonte de dados ou quando os dados na área não são confiáveis. No entanto, para que o SDB seja incorporado aos produtos cartográficos, é necessário atribuir um CATZOC e atender a todos os parâmetros de qualidade dos dados, o que não é uma tarefa simples em SDB, visto que isso depende de diversos fatores ambientais e da imagem.

Embora existam grandes desafios para tornar essa tecnologia para fins cartográficos, a extração de batimetria a partir de imagens tem sido reconhecida e fortemente investigada. O *United Kingdom Hydrographic Office* (UKHO) publicou em 2015 a sua primeira carta náutica (carta número 2066) com profundidades derivadas de imagem de satélite. Em 2018, o Serviço Hidrográfico Canadense (CHS) também usou informações derivadas do SDB em uma carta para *Havre-aux-Maisons* (carta número 4955), classificada como nível CATZOC C. Em 2022, a MCD (*Marine Chart Division*), atualizou seu manual de cartas náuticas, incorporando diversas exigências quanto ao uso da



batimetria derivada por satélite. Portanto, destaca-se que os Serviços Hidrográficos tem demonstrado avanços promissores quanto ao uso e a aprovação do SDB para fins de produção cartográfica.

2. MATERIAL

A área sob investigação, STEER, foi escolhida com base nas condições gerais de águas claras, níveis de turbidez médios a baixos e ambientes aquáticos complexos. STEER está localizado no extremo sudeste da ilha de St. Thomas nas Ilhas Virgens Americanas, com uma área total de aproximadamente 9,6 km².

Para aplicação do modelo, foram usadas imagens Sentinel-2A, referentes ao dia 15 de janeiro de 2019, sem nenhuma cobertura de nuvem. As imagens foram obtidas por intermédio da ferramenta *Earth Explorer*, mantida pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2022). Além disso, destaca-se que as imagens já foram adquiridas com correções geométricas, radiométricas (reflectância TOA) e ortorretificação oriundas da *European Space Agency* (ESA). Observações de alta resolução ALB com profundidades de até 20 m, coletada pelo *National Geodetic Survey* (NGS) em de 20 de janeiro à 2 de junho de 2019, foram usadas como dados de referência para treinamento e validação.

3. METODOLOGIA

3.1. SDB

Este trabalho investiga a segmentação da área a fim de contribuir na melhora

das estimativas batimétricas usando imagem de satélite para fins de mapeamento cartográfico. A metodologia proposta, resumida no fluxo de trabalho (Figura 1), utiliza o modelo estendido de Dierssen (FREIRE, 2017). O procedimento usado para derivar batimetria por imagem pode ser descrito, de forma resumida por: (a) pré-processamento: que inclui um aprimoramento radiométrico, separação terra/água e filtragem espacial através de um filtro passa-baixa de média 3x3, minimizando ruídos e o efeito de borramento da imagem; (b) aplicação do algoritmo batimétrico: neste caso, foram usadas as bandas do azul e do verde, e o modelo estendido de Dierssen foi calibrado para cada unidade segmentada; e (c) referenciamento vertical.

Antes da aplicação do modelo batimétrico, as imagens foram corrigidas atmosféricamente usando o processador ACOLITE de código aberto e desenvolvido pelo *Royal Belgian Institute of Natural Sciences* (RBINS). O conjunto de dados ALB (originalmente referenciado em NAD83) foi transformado em WGS-84 (o mesmo Datum das imagens Sentinel-2A) usando o software VDatum desenvolvido pela NOAA/NOS e dividido em dois conjuntos de dados: treinamento (para o processo de calibração do modelo) e validação (para a análise da acurácia). Em seguida, as áreas sem água (terra seca) foram mascaradas aplicando a técnica *Normalized Difference Water Index* (NDWI).

Posteriormente, a solução do modelo estendido de Dierssen ($X = m_0, L_{w1}, L_{w2}, m_1$) foi derivada por meio de etapas que consistem em: (a) estimativa do vetor

inicial (X_0), (b) desenvolvimento da matriz jacobiana, e (c) minimização da soma quadrática dos resíduos. Os quatro parâmetros calculados na solução são aplicados a cada pixel da imagem, produzindo a superfície SDB. O elemento em destaque desse trabalho é que a solução do modelo (X) foi derivada e aplicada para cada área segmentada de acordo com a abordagem geográfica adotada, ao contrário do que é realizado em abordagens convencionais, em que uma solução única é derivada para toda a cena.

3.2. Abordagem geográfica

Embora a abordagem representada pela Equação (1) seja simples e, usualmente adequada, quando aplicada de forma única para toda a imagem, áreas com tipos de fundo e qualidade da água que variam espacialmente podem apresentar resultados que não refletem inteiramente a realidade da cena. No entanto, a magnitude

da heterogeneidade espacial depende da escala, e a segmentação da cena da imagem pode vir a minimizar a variação do tipo de fundo e da coluna de água dentro desses segmentos, permitindo estimar os parâmetros ideais. Desta forma, foi proposto segmentar a cena de acordo com duas abordagens:

- **Segmentação horizontal regular:**

a área é dividida em células regulares para derivar uma solução SDB (Figura 2). O tamanho de duas células foi avaliado arbitrariamente de acordo com o número de pontos dentro das células, sendo primeiramente divididos em pequenos segmentos de 30 x 30 pixels (célula menor). Quando essas células não são capazes de prover uma solução devido ao número insuficiente de pontos de controle dentro do segmento, elas são mescladas em uma grade maior de 150 x 150 pixels (célula maior), resultando na superfície batimétrica final por segmentação horizontal regular.

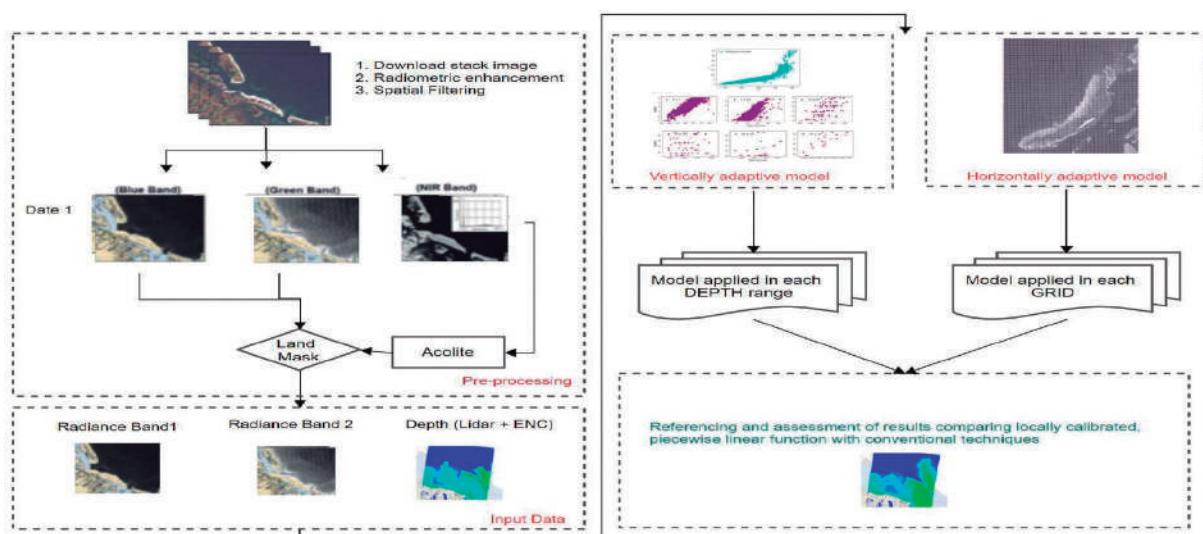


Figura 1 – Fluxo de trabalho da batimetria derivada por satélite usando a abordagem geográfica

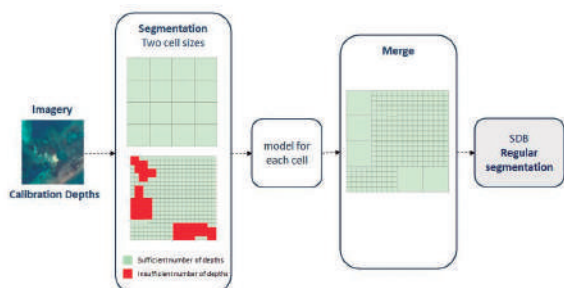


Figura 2 – Fluxo de trabalho da abordagem geográfica baseada na segmentação horizontal regular

• **Segmentação vertical:** a segmentação vertical explora a melhor solução de aproximação relacionando o modelo e as profundidades de referência aplicando uma função por partes (Figura 3). A segmentação vertical consiste em dividir o conjunto de dados em intervalos de profundidade de 5 e 10 metros. Um modelo foi calibrado para cada faixa de profundidade usando os pontos de dados de treinamento que estão inseridos dentro de cada intervalo.

O modelo foi calibrado para cada unidade espacial segmentada considerando as profundidades de referência e

seus correspondentes valores da função logarítmica da radiância dentro de cada segmento. Assim, vários modelos foram calibrados em vez de um único modelo para toda a cena. Embora a forma matemática seja a mesma em todos os segmentos, os parâmetros do modelo são determinados de forma otimizada dentro de uma região geográfica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao subdividir a cena em vários segmentos e, em seguida, calibrar o modelo dentro de cada unidade espacial, novas estimativas de profundidade (solução SDB) são calculadas. O desempenho das abordagens geográficas foi avaliado de acordo com seu RMSE global e a cada 5 metros, e seus respectivos CATZOC referente à acurácia vertical, utilizando os pontos de verificação independentes da profundidade de referência (Tabela 1). A coluna *Units* (Unidades) informa o número de segmentos criados em cada abordagem.

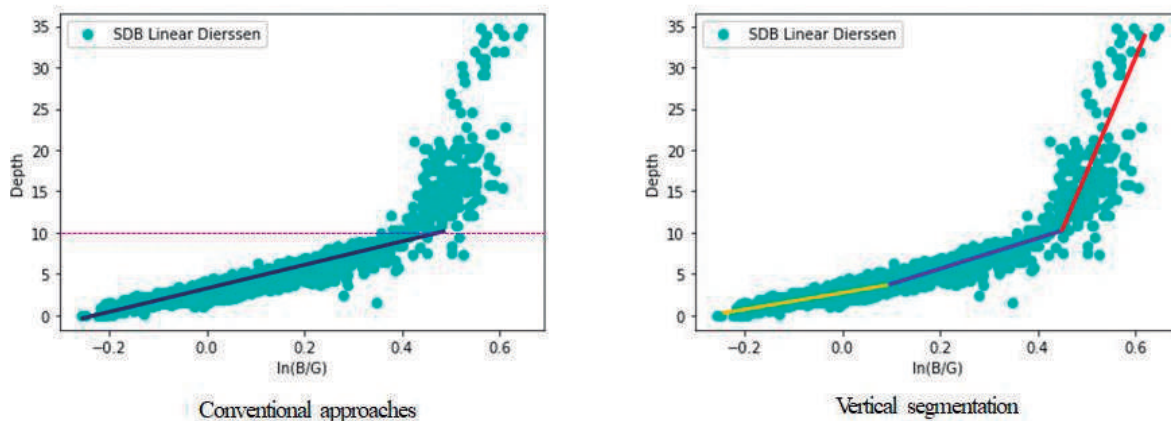


Figura 3 – Conceito da abordagem convencional comparado ao da abordagem de segmentação vertical. À esquerda, a regressão linear para toda a área até a profundidade de extinção e, à direita, a solução é aplicando a função por partes por faixas de profundidade

Tabela 1 – Comparação entre as abordagens de acordo com o RMSE por profundidades e CATZOC/ZOC para 20m

Abordagem		0 - 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	0 -20	Units	ZOC	R ²
Horizontal	Regular	0,81	0,63	0,93	1,16	0,90	122	C	0,97
Vertical	5 m	0,66	0,96	0,83	1,06	0,88	4	C	0,97
	10 m	0,78	1,02	1,07	1,29	1,05	2	C	0,96
Convencional	Global	0,65	0,84	1,15	1,72	1,15	1	C	0,96

Na abordagem geográfica, o RMSE calculado varia de 0,88 a 1,05 m. Como já era esperado, o coeficiente de determinação (R^2) está fortemente relacionado com a magnitude do RMSE, ou seja, um coeficiente de correlação mais baixo está associado a um erro maior, o que se observa na abordagem convencional e na segmentação vertical a cada 10 m.

Entre todas as abordagens, a segmentação vertical com intervalo de profundidade de 5 m apresentou o melhor desempenho em termos de RMSE – 0,88 m, melhorando a acurácia geral em 23,47% em relação ao método global convencional.

Com relação a segmentação regular, quando comparada à abordagem convencional, o RMSE geral foi de 0,90 m, representando melhora de 21,73%. Um fator relevante que deve ser considerado nessa abordagem é o número de segmentos formado. Enquanto os modelos convencionais se utilizam de um único modelo aplicado para toda a cena, o modelo vertical usa 2 segmentos na segmentação vertical de 10 m, 4 na segmentação vertical de 5 m, e 122 segmentos na abordagem horizontal regular. Esse número, expressivamente superior na segmentação horizontal regular, faz com que a referida segmentação seja altamente dependente do número de pontos disponíveis dentro de cada grade.

Quando um número pequeno ou insuficiente de pontos de controle está dentro da célula menor (30 x 30 pixels), a célula maior (150 x 150 pixels) é usada, conforme explicado no Item 3.2. Por usar dados ALB como pontos de controle, cuja cobertura de dados é densa, uma grande proporção das células menores (77%) possuíam pontos de controle suficientes e foram utilizadas para a calibração do modelo, o restante (23%) foi combinado com as células maiores. Caso haja indisponibilidade de densa cobertura de dados como pontos de calibração, como é o caso de SBES ou dados provenientes da carta náutica, essa abordagem deve ser reavaliada no que se refere ao tamanho dos segmentos, uma vez que o tamanho das células deverá ser maior a ponto de conter um número significativo de pontos de calibração dentro de cada grade.

Com relação à segmentação vertical, a divisão da área em intervalos de profundidade menores aumentou a acurácia da batimetria estimada. O RMSE geral usando um intervalo de 5 m foi de 0,88 m, melhora de 16,19% em relação à segmentação de 10 m e 23,47% em comparação com a abordagem convencional.

De modo geral, observa-se que a acurácia das estimativas batimétricas aplicando a abordagem geográfica apresenta melhor performance quando comparada com a abordagem global convencional.



No entanto, quando avaliada a cada 5 m, observa-se que, dependendo do intervalo, nem sempre o modelo geográfico se apresentou mais eficaz. Essa observação fica mais evidente quando a variação do erro é plotada a cada 2 m, como pode ser observado na Figura 4.

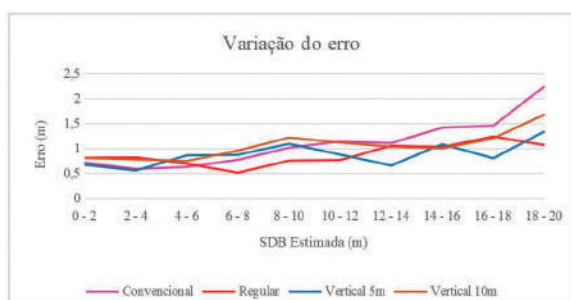


Figura 4 – Variação do erro da abordagem convencional e dos geográficos

Analisando o gráfico da figura acima, observa-se que, de uma forma geral, as abordagens apresentaram uma tendência de aumento do erro, apresentando maiores erros para as áreas mais profundas. No entanto, até a faixa de 10 m, a única abordagem que se apresentou melhor que a convencional foi a de segmentação

regular. Diferentemente do resultado obtido após os 10 m, em que todas as abordagens geográficas tiveram melhores desempenhos quando comparado ao modelo único. Na segmentação regular, o erro é mais expressivo próximo à linha da costa e é reduzido gradualmente até os 8 m de profundidade. A partir deste ponto, começa a aumentar novamente. Da mesma forma, ocorre com a segmentação vertical, no entanto, quando particionada em intervalos de 5 m, existe uma tendência flutuante do erro em torno de 1 m, enquanto as demais abordagens apresentam claramente uma tendência de aumento.

O fato do erro se apresentar oscilante em vez de seguir uma tendência crescente na abordagem de segmentação vertical em intervalos de 5 m chamou a atenção e fez com que mais análises fossem realizadas. Desta forma, como ilustrado na Figura 5, foram criados gráficos comparando os pontos de controle provenientes do ALB versus a batimetria estimada em cada abordagem.

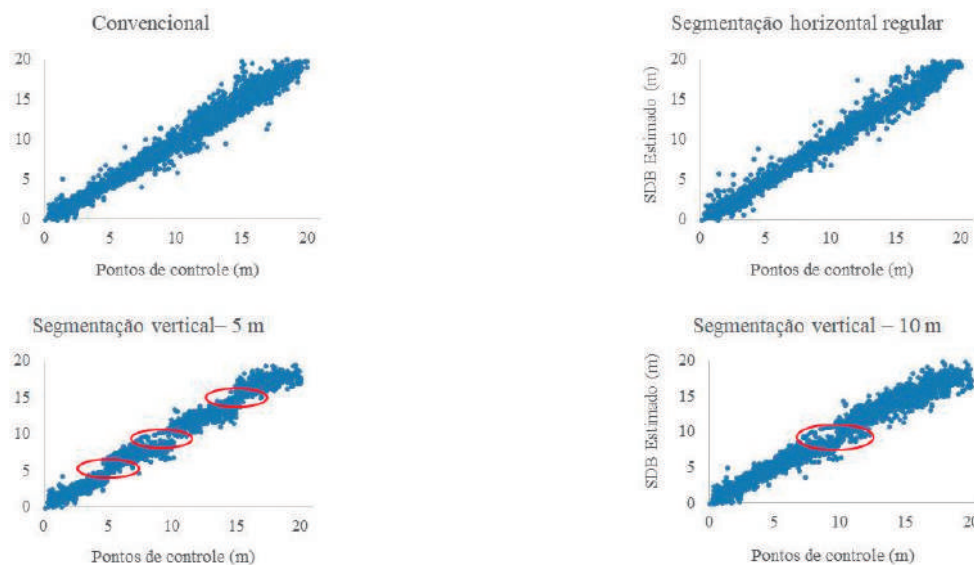


Figura 5 – Gráficos de dispersão das profundidades estimadas pelo SDB usando a abordagem (a) convencional (b) de segmentação horizontal regular (c) de segmentação vertical – 5 m, e (d) de segmentação vertical – 10 m

Ao analisar os gráficos da Figura 5, observa-se que existe uma descontinuidade da superfície batimétrica nos gráficos de abordagem vertical, mostrando profundidades discretizadas em relação ao tamanho da faixa de profundidade. Essa descontinuidade das profundidades estimadas, também mencionada nos trabalhos de Wei & Theuerkauf (2020) e Rubert *et al.* (2003), é causada devido à aplicação de funções por partes. Uma vez que os modelos são calibrados separadamente para cada faixa de profundidade, e à medida que esses intervalos se reduzem, as profundidades são ajustadas dentro do segmento, resultando nessa aparência comprimida nos gráficos (c) e (d) da Figura 5.

Embora a abordagem de segmentação vertical com intervalo de 5 m tenha apresentado a melhor acurácia (RMSE = 0.88), é importante observar que ainda restam dúvidas sobre a interpretação desse resultado devido à aparência discretizada dos dados e, em particular, se pode estar relacionado ao *overfitting*, em vez de uma melhoria real na acurácia. Desse modo, recomenda-se que trabalhos futuros incluam testes adicionais para investigar a real aferição da abordagem, usando diferentes fontes de dados para calibração e validação.

Ao segmentar a área e otimizar os parâmetros do modelo para cada unidade espacial, os efeitos da variação do tipo de fundo e da qualidade da água foram reduzidos, melhorando a acurácia e a confiabilidade das profundidades estimadas a partir

da imagem. No entanto, uma das limitações do método é o número necessário de profundidades de treinamento; à medida que os segmentos se tornam menores, o número total de pontos para treinar o modelo aumenta. Quando o modelo é aplicado, são necessários, no mínimo, quatro pontos de treinamento para cada unidade espacial. Embora esses números de pontos sejam capazes de fornecer uma solução, para obter um bom desempenho do modelo e, conseqüentemente, um melhor resultado, na prática, o número ideal de pontos de calibração pode depender de diversos fatores, tais como a geomorfologia da área de estudo, o número e tipos de substratos e o tamanho da área de estudo.

Além disso, é importante ressaltar que a abordagem geográfica quando comparada à convencional consiste em um número maior de processos, uma vez que o modelo aplicado para cada segmento criado demanda mais tempo de processamento.

Referente à categorização dos resultados do SDB de acordo com o CATZOC, nenhum avanço pode ser notado, uma vez que todas as abordagens apresentaram CATZOC C referente à acurácia vertical para as profundidades de 20 m. No entanto, com o RMSE reduzido nas abordagens geográficas, é importante destacar que existe uma proximidade em atingir o CATZOC B: 0,3 m é a acurácia vertical restante para classificar em B a segmentação vertical – 5 m, enquanto para a abordagem convencional é 0,8 m.



5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As tecnologias convencionais de levantamento e mapeamento, embora sejam capazes de coletar informações muito acuradas, representam um desafio operacional e logístico, devido às limitações de tempo, ao risco de levantamento em ambientes próximos à costa e, principalmente, ao alto custo das operações. Buscando por alternativas com custos reduzidos e capazes de obter informação batimétrica em águas rasas, esse trabalho investigou a técnica de batimetria derivada por satélite baseada em diferentes abordagens de segmentação da imagem com intuito de abordar as limitações do SDB em relação ao tipo de fundo e à heterogeneidade da qualidade da água e assim melhorar a performance da batimetria estimada. A lógica por trás da segmentação é que em unidades espaciais menores as condições ambientais devem ser mais estáveis do que em toda a cena.

Os resultados apresentaram melhora ao segmentar a cena, tanto verticalmente quanto horizontalmente, com um ganho de mais de 20% quando comparado ao modelo único aplicado em toda a imagem. A segmentação vertical proporcionou melhor desempenho no aumento da acurácia da profundidade devido às funções por partes, além de exigir um número menor de pontos de controle quando comparado à segmentação

horizontal regular. No entanto, as previsões discretizadas dos modelos demonstrados pela segmentação vertical constroem uma superfície descontínua dos dados e levantam a questão do *overfitting* em vez de uma melhora real na acurácia, algo que deve ser investigado em trabalhos futuros.

Por outro lado, embora tenha havido uma melhora nas profundidades estimadas com a abordagem de segmentação horizontal em comparação com o convencional, essa abordagem requer um número de pontos de controle muito superior às demais abordagens, além de possuir uma dependência no tamanho da célula.

De modo geral, houve uma melhora na acurácia das estimativas batimétricas ao segmentar a cena em unidades espaciais menores e recomenda-se avaliação do uso da abordagem para obtenção de melhores resultados, principalmente, com relação a investigações que envolvam mais fatores do fundo marinho e que possam vir a contribuir no número otimizado de segmentos.

Como citado anteriormente, o uso do SDB possui barreiras em relação aos Serviços Hidrográficos, tendo em vista as diversas limitações já mencionadas. No entanto, trabalhos como este, além de impulsionar pesquisas, são uma excelente oportunidade para subsidiar os membros da OHI para uma aplicação regulamentada das informações do SDB dentro de produtos de navegação, e assim contribuir nos processos de produção cartográfica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFFONSO, J. J. *A geographic segmentation approach for satellite-derived bathymetry. (Dissertação de Mestrado, University of New Hampshire)*, 2022, Durham

ASHPHAQ, M. *et al. Review of near-shore satellite derived bathymetry: Classification and account of five decades of coastal bathymetry research. Journal of Ocean Engineering and Science*, 2021, 6: 10-101

DIERSSEN, H. M., *et al. Ocean color remote sensing of seagrass and bathymetry in the Bahamas Banks by high-resolution airborne image. Limnology and Oceanography*, 2003, 48: 444–455.

FREIRE, R.R. *Evaluating Satellite Derived Bathymetry in Regard to Total Propagated Uncertainty, Multi-Temporal Change Detection, and Multiple Non-Linear Estimation (Dissertação de Doutorado, University of New Hampshire)*, 2017, Durham. Disponível em: <https://scholars.unh.edu/dissertation/2281/>

GEBCO, 2020. Seabed 2030 Projeto. Disponível em: https://www.gebco.net/about_us/seabed2030_project/

GODWIN B., *Penetration of Visible Radiation from Sunlight through Water. University of Minnesota Sea Grant Program.*, 2021.

IHO (International Hydrographic Organization). *S-4 - Regulations of the IHO for international (INT) charts and chart specifications of the IHO: Monaco, the Principality of Monaco*, 2018.

IHO (International Hydrographic Organization) *S-57 – IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data: Monaco, the Principality of Monaco*, 2000.

KASTRISIOS, C., & WARE, C. *Textures for coding bathymetric data quality sectors on electronic navigational chart displays: design and evaluation, Cartography and Geographic Information Science*, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15230406.2022.2059572>.

PE'ERI, S., *et al. Satellite Remote Sensing as a Reconnaissance Tool for Assessing Nautical Chart Adequacy and Completeness. Marine Geodesy*, 2014, 37(3): 293-314.

RUPPERT D., *et al. Semiparametric Regression. Cambridge, New York: Cambridge University Press*; 2003, pp. 386.

WEI, C. & THEUERKAUF, S. J. *A Novel Multitemporal Approach for Satellite-Derived Bathymetry for Coastal Waters of Palau. Journal of Coastal Research*, 2020, 37: 336–348.



EMPREGO DAS FUNÇÕES ORTOGONAIS EMPÍRICAS NA TOMOGRAFIA ACÚSTICA OCEÂNICA

Rodrigo Soares de Freitas^{1*}
*Vicente Barroso Junior*²
*Rogério de Moraes Calazan*³

RESUMO

A Tomografia Acústica Oceânica (TAO) tem como objetivo determinar propriedades do ambiente marinho por meio da sensibilidade do campo acústico às variações de parâmetros como a temperatura da água do mar. Entre os métodos disponíveis, a tomografia por campo casado se mostra promissora, sendo necessário para tal o emprego das funções ortogonais empíricas, de modo a viabilizar a inversão do perfil de velocidade do som. Demonstra-se que o método é válido para uma busca exaustiva de perfis de velocidade do som, apesar de requerer maior desenvolvimento desse algoritmo para permitir o refinamento do resultado encontrado e a redução do custo computacional. A TAO contribui gerando produtos de interesse para a Oceanografia e permitindo o monitoramento contínuo e em tempo reduzido de uma extensa área, o que simplifica os processos usuais de medições *in situ* e os custos envolvidos.

¹ Oficial da Armada. Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina (PPGAS) do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM). Email: rodrigodfreitas@gmail.com

² Oficial da Armada. Doutor em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ com Desenvolvimento Tecnológico e Inovação na Universidade do Algarve (UAIG) em Portugal, atuando nas áreas de Hidroceanografia e Acústica Submarina. Vice-Diretor do IEAPM e Professor do PPGAS.

³ Oficial do Quadro Técnico. Doutor em Engenharia Eletrônica e Telecomunicações pela UAIG na área de Acústica Submarina. Encarregado da Divisão de Geoacústica e Professor do PPGAS.

Palavras-chave: tomografia acústica oceânica; perfil de velocidade do som; decomposição em valores singulares; funções ortogonais empíricas.

ABSTRACT

The Ocean Acoustic Tomography (OAT) aims to determine properties of the marine environment through the sensitivity of the acoustic field to variations in parameters such as sea water temperature. Among the available methods, matched-field tomography holds promise, requiring the use of empirical orthogonal functions to enable the inversion of the sound-speed profile. The method is shown to be valid for an exhaustive search of sound-speed profiles, although further development of the algorithm is needed to refine the results and reduce computational costs. OAT presents itself to contribute by generating products of interest for Oceanography and allowing the continuous and short-time monitoring of a large area, which simplifies the usual processes of *in situ* measurements and the costs involved.

Keywords: ocean acoustic tomography; sound speed profile; singular value decomposition; empirical orthogonal functions.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de TAO surgiu dentro da acústica submarina com a ideia de monitorar mudanças no meio marinho, utilizando informações contidas na propagação de um sinal acústico nesse ambiente. É uma poderosa ferramenta

alternativa e complementar aos métodos tradicionais da Oceanografia Física, permitindo o sensoriamento remoto de parâmetros, como o perfil de velocidade do som (*sound-speed profile* – SSP), as correntes oceânicas e o perfil de temperatura na coluna d'água. Dessa forma, é possível gerar como resultado uma “imagem” da estrutura de uma extensa área do oceano (TAROUDAKIS, 2002).

Inicialmente, Munk & Wunsch (1979) propuseram a TAO como uma técnica complementar ao estudo da Oceanografia, a qual utiliza imageamento por satélites para monitoramento das feições oceânicas de mesoescala, que são caracterizadas por uma escala espacial, de aproximadamente 100 km, e uma temporal, de cerca de 100 dias, em regiões de águas profundas. Baseava-se no cálculo do tempo de chegada de pulsos acústicos transmitidos entre fontes e receptores para estimar as variações de velocidade do som e, indiretamente, as variações de temperatura, uma vez que a primeira é dependente linearmente da segunda. Como a medição é feita por meio da velocidade do som no mar (aproximadamente 1500 m/s), em relação às obtidas através de múltiplas medições locais por equipamentos em navios, a TAO pode prover informações sinóticas com atualizações mais rápidas e com menor custo (SPINDEL, 2005).

Outro método para a TAO, denominado tomografia por campo casado (*matched-field tomography* – MFT), é baseado no processamento de campo casado (*matched-field processing* – MFP), desenvolvido, a princípio, para a localização



de fontes. No MFP, um sinal é transmitido por uma fonte e recebido em um conjunto de hidrofones (arranjo ou *array*). O campo acústico capturado pelos hidrofones é comparado com a previsão de um modelo de propagação acústico para milhares de posições candidatas. Através de uma função de correlação (correlator), a correspondência do campo medido com o campo simulado pelo modelo (denominado réplica) é quantificada. A posição candidata que obtiver o maior valor de correlação é então sugerida como a posição real da fonte no instante da gravação dos dados no *array* (BAGGEROER *et al.*, 1993). A Figura 1 – apresenta um quadro resumo do MFP para a localização. A superfície de ambiguidade (canto inferior direito) representa a quantificação da função de correlação para todas as posições candidatas de um determinado campo de busca (canto inferior esquerdo) para o cálculo das réplicas.

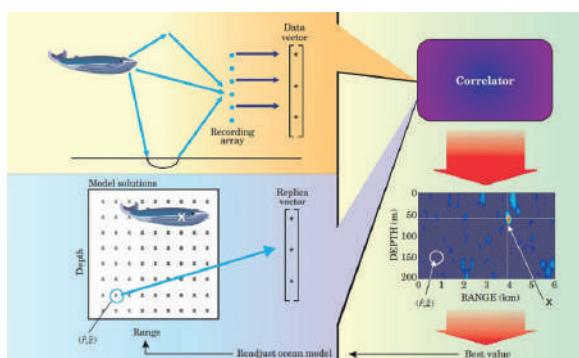


Figura 1 – MFP para a localização de fontes acústicas. Fonte: Kuperman & Lynch (2004)

Na adaptação do MFP para a MFT, ao invés de se buscar posições, o algoritmo é adaptado para a busca de SSPs candidatos. Para o sucesso do método é fundamental que o modelo de propagação esteja bem ajustado ao ambiente real, ou

seja, é necessário o conhecimento prévio da geometria (batimetria e posições da fonte e *array*) e das propriedades geoacústicas do fundo (velocidade do som, atenuação e densidade). O SSP candidato com maior correlação é proposto como o perfil médio da região considerada entre a fonte e o *array* (TOLSTOY *et al.*, 1991).

Um dos modelos de propagação que pode ser utilizado para o cálculo das réplicas de todos os SSPs candidatos, dentro de suas limitações, é o modelo de traçado de raios TRACEO (RODRÍGUEZ, 2011). Ele usa uma abordagem de onda plana para sinais de frequências mais altas na solução da Equação da Onda. Uma de suas vantagens é sua maior velocidade de processamento em ambientes que variam com a distância, por exemplo, quando a batimetria entre fonte e *array* é variável (ETTER, 2003). A figura 2 apresenta um exemplo de campo acústico de perda de transmissão calculado por esse modelo.

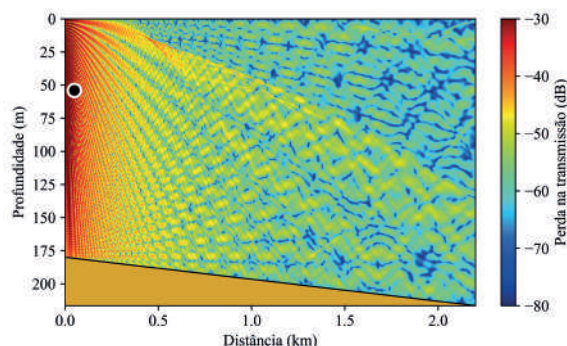


Figura 2 – Previsão de um campo acústico produzido por uma fonte a 54 metros de profundidade em um ambiente com batimetria variável, gerado pelo modelo de raios – TRACEO

A tomografia por tempos de chegada é altamente dependente da separação em tempo da chegada dos raios de múltiplos caminhos e da sincronização permanente dos sinais entre fonte e receptor, além disso, ela explora apenas uma parte

da informação disponível nos dados coletados pelos hidrofones. Já na MFT, a sincronização é desnecessária e as informações contidas nos dados são mais bem exploradas, levando em consideração a amplitude e a fase. Por outro lado, a MFT depende de um *array* com um número significativo de hidrofones distribuídos pela coluna d'água e possui um custo computacional elevado para cálculo de muitas réplicas, o que pode ser mitigado com o uso de outra ferramenta: a focalização (MARIN, 2015).

Na Marinha do Brasil, o Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) possui, em fase de desenvolvimento, o Laboratório de Monitoramento por Métodos Acústicos da Ressurgência (LABMMAR), uma estrutura instalada no Pontal do Atalaia, em Arraial do Cabo-RJ, e utilizada como base para estudos do fenômeno da ressurgência. O LABMMAR será equipado com arranjos de hidrofones para monitorar e coletar sinais ininterruptamente dessa área de mar (IEAPM, 2023). A TAO pode ser uma ferramenta possível de implementação que complementaria os estudos da ressurgência nessa região, monitorando esse fenômeno de maneira contínua.

Este trabalho faz uso das funções ortogonais empíricas (*Empirical Orthogonal Functions* – EOFs) como ferramenta que possibilita inverter (determinar) perfis de velocidade do som através do processamento de campo casado. É apresentada a metodologia para se construir as EOFs através da decomposição por valores singulares e, por fim, a ferramenta é testada na MFT utilizando dados experimentais.

2. METODOLOGIA

Determinar um SSP por meio do cálculo da velocidade do som para cada ponto de discretização de profundidade iria se tornar um problema bastante complexo. Com o objetivo de reduzir o tamanho deste problema, lança-se mão de uma análise estatística de dados medidos previamente (SOARES & JESUS, 2004).

As EOFs representam uma forma de parametrizar um conjunto de dados coletados, de forma que cada medição possa ser reconstruída por meio de uma expansão empírica em uma base ortogonal. Elas serão utilizadas para parametrizar variações de SSPs, permitindo a redução do número de variáveis a serem determinadas na MFT (RODRÍGUEZ, 2000).

Primeiramente, são necessárias medições locais de SSPs na região de interesse que se deseja monitorar, com diversidade temporal e espacial. É importante obter dados que possibilitem uma boa representação da variabilidade do comportamento do SSP da região. Quanto mais complexa for a região (por exemplo, regiões de ressurgência), maior será a necessidade de informações prévias dos SSPs possíveis nessa na região.

Na abordagem usada por Beckers & Rixen (2003) para calcular as EOFs, tendo a profundidade máxima local discretizada em M intervalos, em um total de N medições de SSP, é criada uma matriz \mathbf{X} , $M \times N$, com os dados coletados, sendo x_{ij} a velocidade do som c na profundidade i da observação j . Como as observações são feitas em diferentes pontos geográficos devem existir diferentes profundidades.



A maior delas será usada como base para as demais e os dados inexistentes serão completados com o valor médio das medições existentes em cada linha.

O perfil médio \mathbf{c}_0 é um vetor com M linhas, calculado a partir das N medições de SSP.

A matriz de valores residuais $\mathbf{E} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_N)$, também $M \times N$, é calculada a partir de \mathbf{x}_n (a n -ésima coluna de \mathbf{X}):

$$\mathbf{e}_n = \mathbf{x}_n - \mathbf{c}_0$$

(Equação 1)

Aplica-se em \mathbf{E} a decomposição em valores singulares (*singular value decomposition* - SVD), onde * representa a conjugada transposta (ANTON & RORRES, 2001):

$$\mathbf{E}_{M \times N} = \mathbf{U}_{M \times M} \mathbf{D}_{M \times N} \mathbf{V}_{N \times N}^* = \sum_{k=1}^N \gamma_k \mathbf{u}_k \mathbf{v}_k^*, \quad \mathbf{u}_k \text{ e } \mathbf{v}_k \text{ ortonormais};$$

(Equação 2)

A matriz $\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_M)$ é formada pelos autovetores \mathbf{u}_k da matriz $\mathbf{E}\mathbf{E}^*$, a matriz $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_N)$ pelos autovetores \mathbf{v}_k de $\mathbf{E}^*\mathbf{E}$ e a matriz \mathbf{D} é a matriz diagonal com N valores singulares γ de \mathbf{E} .

As EOFs, portanto, são os autovetores \mathbf{u}_k , de M linhas e norma 1, com $1 \leq k \leq N$.

O uso da SVD permite que seja possível uma melhor aproximação na reconstrução de \mathbf{X} com menos de N EOFs. Cada EOF possui uma medida de quão bem representado é o conjunto de dados, calculado a partir dos valores singulares, tal medida, chamada de “energia da EOF”, é dada em porcentagem. As primeiras EOFs possuem mais energia, e uma escolha comum para o número de EOFs a ser utilizado é aquele que, somando-se as energias,

atinge-se 80 a 95% da representação dos dados. A Equação 3, abaixo, calcula a energia das K primeiras EOFs.

$$\text{energia} = \left(\sum_{k=1}^K \gamma_k^2 \right) / \left(\sum_{k=1}^N \gamma_k^2 \right)$$

(Equação 3)

Tendo-se escolhido o número K de EOFs a ser utilizado, a reconstrução de um SSP é possível somando-se ao perfil médio \mathbf{c}_0 cada EOF multiplicada por um coeficiente escalar α , de acordo com a Equação 4, abaixo.

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 + \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{u}_k$$

(Equação 4)

As EOFs geradas devem ser capazes de reconstruir qualquer SSP utilizado na construção da matriz \mathbf{X} . Para tal, a fim de se reconstruir o SSP correspondente à coluna t de \mathbf{X} , os coeficientes α serão determinados pelo valor de projeção de \mathbf{e}_t sobre cada EOF. Tendo-se os coeficientes de todas as EOFs calculados, o SSP da coluna t é reconstruído pela Equação 4.

Na MFT, os SSPs candidatos serão formados a partir de um determinado intervalo de valores para os coeficientes de cada EOF. Estes intervalos devem levar em consideração dados de conhecimento prévio sobre o comportamento dos SSPs e suas limitações físicas na região (TAROU-DAKIS & SMARAGDAKIS, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia apresentada é demonstrada usando dados disponíveis no *website* do Experimento SWellEx-96,

promovido pela *Scripps Institution of Oceanography*, nas proximidades de *Point Loma, San Diego, CA*, entre 10 e 18/05/1996 (MPL, 1996), desenvolvido para estudos de processamento de campo casado. Nessa janela temporal, foram realizadas 51 estações de CTD (*Conductivity-Temperature-Depth*), em diversos pontos da costa, com distâncias de até 23 km de *Point Loma*, numa área com profundidade média de 200 m, conforme a Figura 3 abaixo.

foram extrapolados com os valores do SSP médio. Dessa matriz X deriva-se a matriz de valores residuais, descontando-se o SSP médio de cada coluna.

Aplicando-se o método da SVD à matriz de valores residuais E , obtém-se 51 EOFs e 51 valores singulares. Com a Equação 3, para o cálculo da energia das EOFs, verifica-se que 86% da energia é obtida com o uso de apenas 3 EOFs, enquanto são necessárias 7 EOFs para atingir 95% da energia, nesse conjunto de dados.

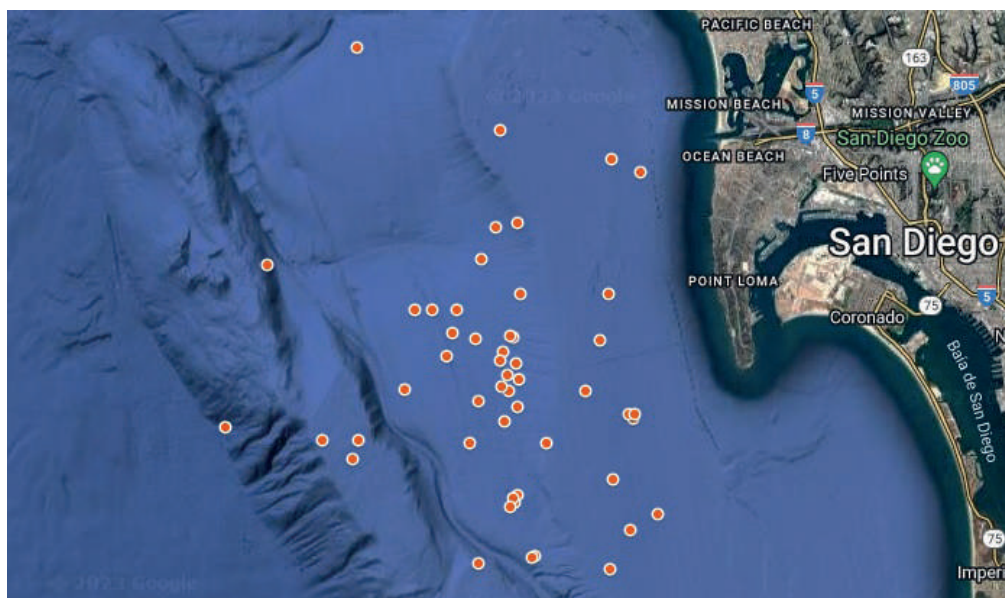


Figura 3 – Estações de CTD realizadas entre 10 e 18MAI96, durante o Experimento SWellEx-96

A profundidade máxima ocorreu na estação de CTD nº 31, 212,5 m, e foi utilizada como referência para as demais. O SSP médio foi calculado utilizando-se somente os dados disponíveis das estações com dados medidos para cada ponto de profundidade (discretizada em 426 pontos, com intervalos de 0,5 m).

A matriz de dados das estações X foi construída, portanto, com 426 linhas e 51 colunas. Os SSPs medidos que não atingiram 212,5 m de profundidade,

Nota-se que as demais 44 EOFs contribuem com pouca representatividade em relação às 7 primeiras, estas, somente, já são capazes de reconstruir com boa aproximação outros SSPs dessa região que possuam comportamento estatístico próximo dos 51 medidos. Caso ocorra algum fenômeno oceanográfico que produza um SSP muito distante do padrão medido, as EOFs podem não ser capazes de reconstruí-lo de forma adequada, gerando perfis com picos de valores



indesejáveis, já que a informação desse fenômeno específico não se encontra dentro da matriz \mathbf{X} .

A Figura 4 apresenta um quadro com os principais dados de entrada e saída da SVD.

Qualquer perfil medido pelo CTD deve ser capaz de ser reconstruído perfeitamente utilizando-se as 51 EOFs e seus coeficientes adequados. Na Figura 5, observa-se que a reconstrução do perfil

da estação de CTD nº 5 com 51 EOFs é idêntica ao perfil medido, enquanto as reconstruções com 7 e 3 EOFs apresentam boa aproximação, porém demonstram que o uso de mais EOFs contribui para uma reconstrução mais acurada. A escolha do número de EOFs a serem utilizadas implica no detalhamento do perfil estimado, embora também influencie diretamente no número de coeficientes a serem determinados para a solução do problema.

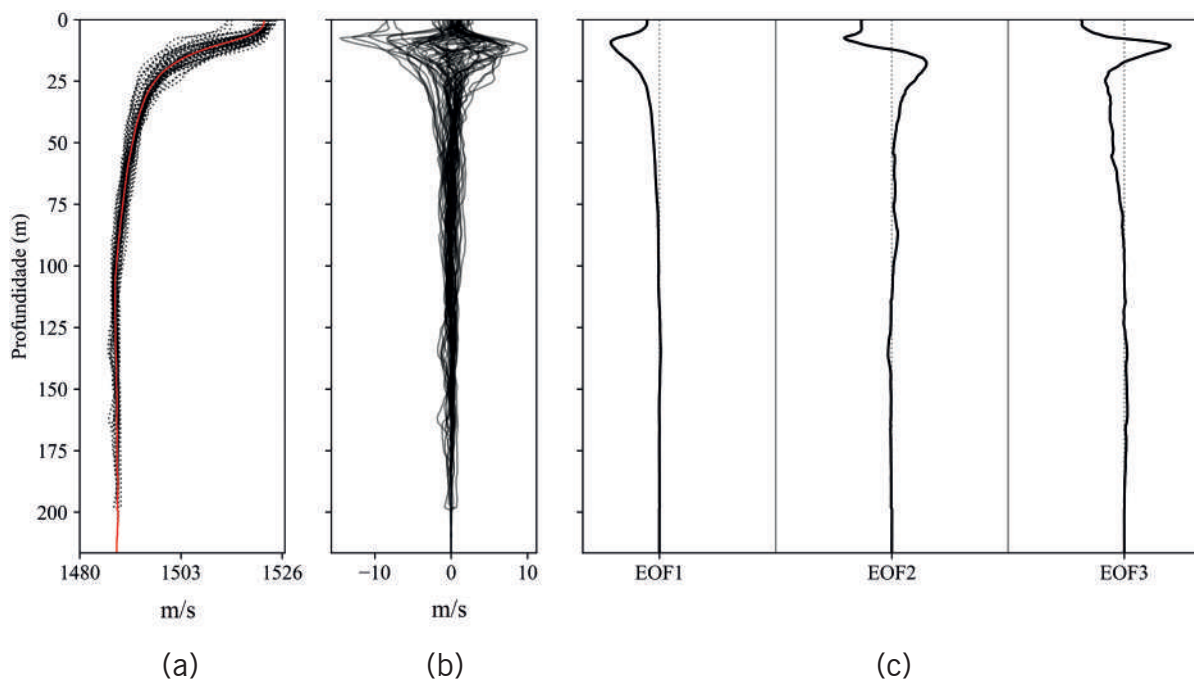


Figura 4 – (a) SSP das 51 estações de CTD e SSP médio, destacado em vermelho; (b) Perfis residuais; e (c) 3 EOFs mais representativas

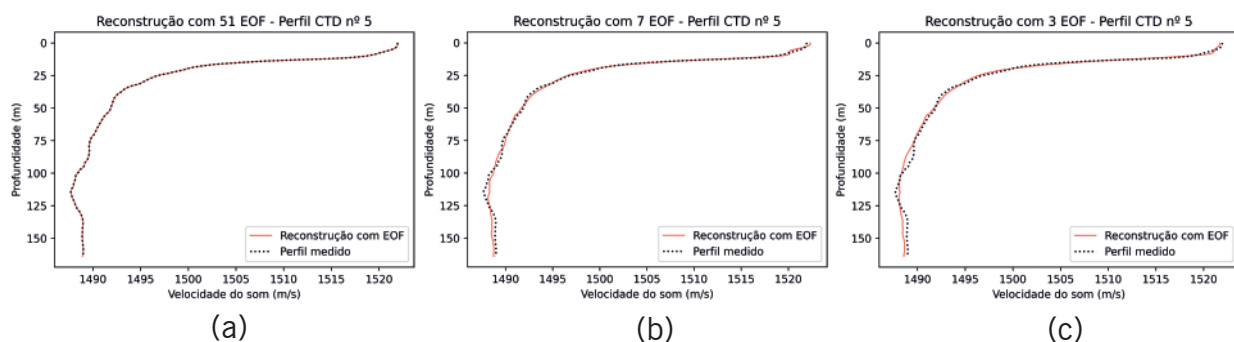


Figura 5 – Reconstrução do SSP medido na estação de CTD nº 5 com: (a) 51 EOFs; (b) 7 EOFs; e (c) 3 EOFs

As EOFs calculadas a partir desse conjunto de dados seriam capazes de reconstruir um SSP médio em outros instantes desejados. Para tal, os coeficientes de cada EOF podem ser determinados através da MFT.

O evento S5 da SWellEx-96 é apresentado na Figura 6. Nele, uma fonte rebocada a aproximadamente 54 m de profundidade emitiu vários tons. Para este trabalho, foi selecionada a frequência de

388 Hz. Os sinais foram gravados utilizando-se um arranjo vertical em linha (*vertical line array* – VLA) de 21 hidrofones, fundeados na profundidade de 216,5 m, onde o primeiro se encontrava a 94 m e o último a 212 m. Na segunda metade do evento, o navio permaneceu sobre a isobatimétrica de 180m. A derrota do navio está representada na Figura 7. A distância entre a fonte e o VLA varia entre 900 e 3200 m.

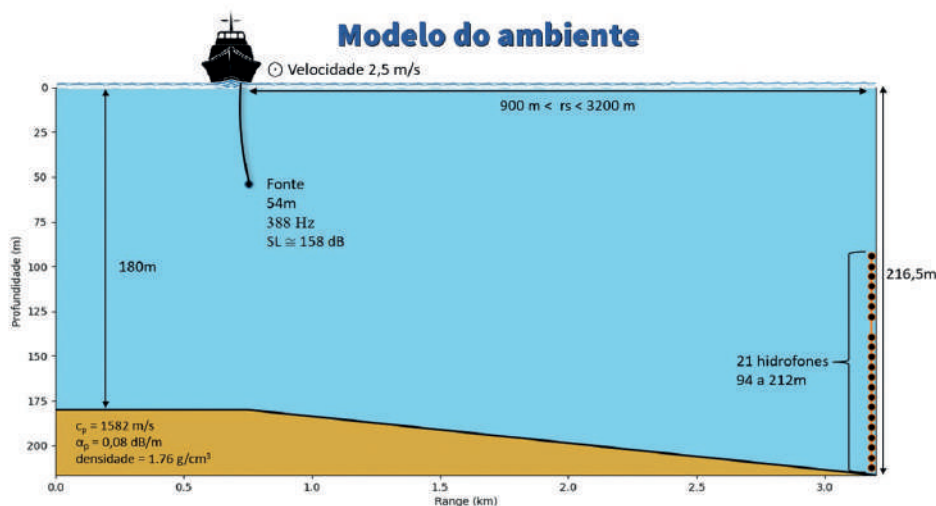


Figura 6 – Esquema do Evento S5 da SWellEx-96

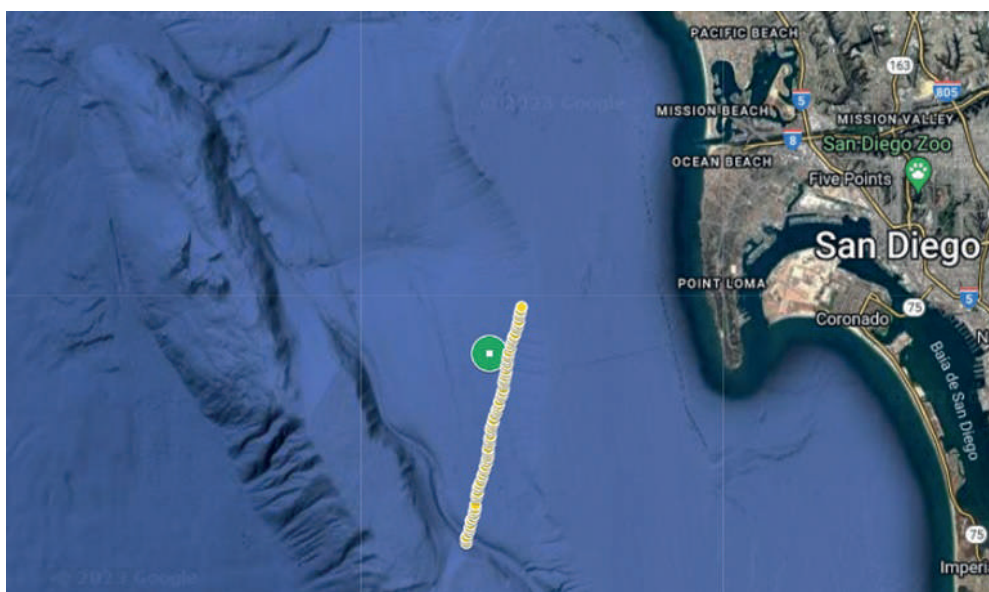


Figura 7 – Derrota realizada no evento S5 (amarelo) e posição do VLA (verde)



Uma inversão foi realizada utilizando-se os dados gravados no minuto 43 do evento, que corresponde ao horário de 16:58 EST, com a fonte localizada a 2.437 m de distância do VLA. O intervalo de busca para os coeficientes das EOFs foi determinado para valores entre -20 e 20, discretizando-o em 101 pontos. Este intervalo está baseado na análise dos coeficientes calculados para se reconstruir cada SSP usado na matriz \mathbf{X} . Somente as duas primeiras EOFs (80% da energia) foram utilizadas na MFT, em seu método clássico

de busca exaustiva global dos coeficientes no intervalo dado. Como existem 101 possibilidades de coeficientes para a EOF1 e 101 para a EOF2, foram geradas 10.201 réplicas por meio do modelo TRACEO. As réplicas foram comparadas com o campo medido pelo VLA usando o processador Bartlett (função de correlação), com resultados variando de 0 a 1. A melhor correlação encontrada foi de 0,65, o que é uma correlação considerada aceitável. A superfície de ambiguidade gerada está na Figura 8 e o SSP reconstruído na Figura 9.

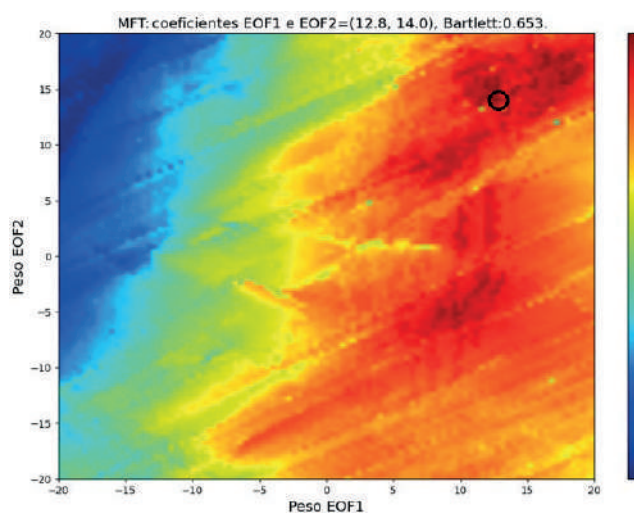


Figura 8 – Superfície de ambiguidade para a busca dos coeficientes das duas EOFs para 16:58 EST

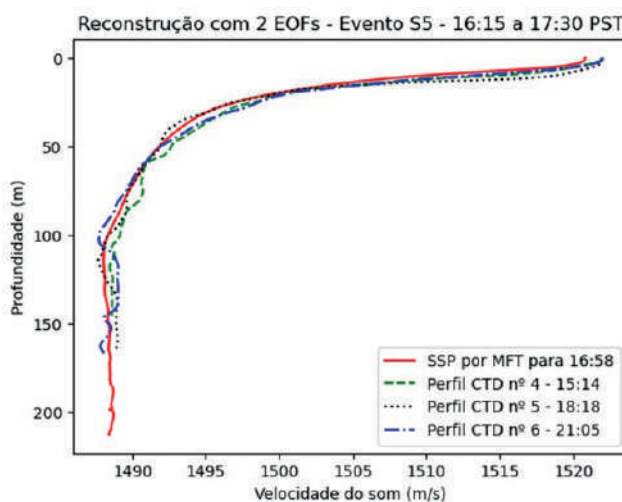


Figura 9 – SSP reconstruído por meio de MFT com 2 EOFs

Apesar de não haver dados de medições locais para o instante considerado, o SSP reconstruído pela MFT apresentou-se coerente com os SSPs medidos antes e após o evento S5. Além disso, o valor obtido de 0,65 na função de correlação indica uma boa correspondência entre o ambiente real e o ambiente modelado para o TRACEO no cálculo da réplica.

A MFT em sua abordagem clássica possui custo computacional bastante elevado para o cálculo com mais de 2 EOFs. No exemplo utilizado, mantendo-se a mesma discretização no espaço de busca para uma terceira EOF, seria necessário gerar mais de 1 milhão de réplicas. Como mencionado anteriormente, o MFT precisa ser otimizado através da focalização, um método de busca mais eficiente para encontrar-se o máximo global de uma função.

Enfatiza-se que o perfil reconstruído não representa um perfil medido em um ponto específico, como quando medido por um CTD, sendo, na verdade, um perfil médio que replica o comportamento de todo o campo de velocidade do som do transecto entre a fonte e o *array* e, portanto, não é esperado que ocorra uma perfeita correlação com um SSP medido no mesmo instante da inversão em algum ponto da região abordada.

4. CONCLUSÃO

As EOFs são uma ferramenta que possibilita a reconstrução de um SSP em uma determinada região analisada. Elas são funções empíricas pois dependem de medições realizadas previamente e sua capacidade de reconstrução está relacionada com os dados dessas medições e com a escolha do número de EOFs a serem empregadas na MFT, de acordo com a energia que cada uma possui.

As EOFs obtidas através dos dados da SWellEx-96 demonstram que para se atingir a faixa de 80% a 95% de representatividade desse conjunto de dados, com as medições de CTD realizadas na área do experimento, são necessárias de 2 a 7 EOFs.

Um SSP do evento S5 foi determinado pela MFT com somente 2 EOFs, para um instante específico. Comparando-se 10.201 réplicas geradas pelo TRACEO com o campo acústico medido pelo *array* de hidrofones, determinou-se a melhor correlação com um valor de 0,65, e o SSP reconstruído é coerente com as medições CTD realizadas antes e depois do evento S5.

Para melhor detalhamento e precisão dos SSPs invertidos é necessária a implementação da focalização no algoritmo da MFT, a fim de permitir uma busca otimizada dentro de mais de duas dimensões.



5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTON, H. & RORRES, C. *Álgebra linear com aplicações*. Bookman, Porto Alegre, RS, 2012.

BAGGEROER, A. B. *et al.* *An overview of matched field methods in ocean acoustics*. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 18, n. 4, p. 401–424, 1993.

BECKERS, J. M. & RIXEN, M. *EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets*. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 20, n. 12, p. 1839–1856, 2003.

ETTER, P. C. *Underwater Acoustic Modelling and Simulation*, Spon Press, 3 ed., London, UK, 2003.

INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA (IEAPM). LABMMAR (Laboratório de monitoramento por métodos acústicos da ressurgência). Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/ieapm/content/labmmar-laborat%C3%B3rio-de-monitoramento-por-m%C3%A9todos-ac%C3%A1sticos-da-ressurg%C3%Aancia>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

KUPERMAN, W. A. & LYNCH, J. F. *Shallow-water acoustics*. *Physics Today*, v. 57, n. 10, p. 55–61, 2004.

MARIN, F. O. *Tomografia Acústica Oceânica por Tempo de Percurso Modal em Águas Rasas*. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Oceânica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2015. Disponível em: <<https://www.siplab.fct.ualg.pt/pubs/fmarin1.15.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2022.

MARINE PHYSICAL LABORATORY - SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY (MPL). *The SWellEx-96 Experiment*. Disponível em: <<http://swellex96.ucsd.edu/index.htm>>. Acesso em: 15 jan. 2023.

MUNK, W. & WUNSCH, C. *Ocean acoustic tomography: a scheme for large scale monitoring*. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, v. 26, n. 2, p. 123–161, fev. 1979.

RODRÍGUEZ, O. C. *Application of Ocean Acoustic Tomography to the estimation of internal tides on the continental platform*. 2000. PhD thesis, University of Algarve, 2000.



RODRÍGUEZ, O. C. *The TRACEO Ray Tracing Program. Universidade do Algarve - Signal Processing Laboratory*, 10 jan. 2011. Disponível em: <<http://www.siplab.fct.ualg.pt/>>. Acesso em: 17 ago. 2022.

SOARES, C. & JESUS, S. M. Processamento por ajuste de campo em acústica submarina e aplicações. *Jornadas do Mar*, 2004.

SPINDEL, R. C. *Ocean acoustic tomography. Em: MEDWIN, H. Sounds in the Sea: From Ocean Acoustics to Acoustical Oceanography. Cambridge University Press, New York, NY, 2005.*

TAROUDAKIS, M. I. *Ocean acoustic tomography. Lecture Notes of the Tutorial Course for Young Acousticians from Europe Countries. Poland: Gdansk, p. 77–95, 2002.*

TAROUDAKIS, M. I. & SMARAGDAKIS, C. *Tomographic and bottom geoacoustic inversions using genetic algorithms and a statistical characterization of the acoustic signal. Acta Acustica united with Acustica, v. 95, n. 5, p. 814–822, 2009.*

TOLSTOY, A. *et al. Acoustic tomography via matched field processing. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 89, n. 3, p. 1119–1127, mar. 1991.*





ESTIMAÇÃO DA LINHA DE COSTA, EM PRAIA COM AMBIENTE DE MESOMARÉ, UTILIZANDO IMAGENS ORBITAIS E DADOS MAREGRÁFICOS

*Edico Ramon de Melo*¹

*Guilherme Antonio Gomes do Nascimento*²

RESUMO

Com objetivo de estimar a linha de costa (LC) para uma época de referência por meio do uso de imagens orbitais e dados de maré, o presente trabalho compara a aplicação de dois modelos: Regressão Linear (RL) e Projeção da Maré Observada (PMO). A avaliação dos resultados obtidos se baseou nas análises estatística e visual. Os resultados mostram um melhor desempenho do PMO em praia com ambiente de mesomaré.

Palavras-chave: linha de costa, ambiente de mesomaré, Sentinel, predição, maré.

ABSTRACT

In order to estimate the coastline (LC) for a reference time through the use of orbital images and tidal data, this study confronts two models: linear regression (RL) and tidal projection (PMO). The evaluation was based on statistical and visual analysis and indicated a better performance of PMO in a mesotidal beach environment.

¹ Oficial do Corpo de Engenheiros da Marinha, Mestrando em Ciências Cartográficas na Universidade Estadual Paulista – UNESP. Email: edico.ramon@marinha.mil.br

² Oficial do Corpo da Armada, Mestre em Ciências Cartográficas pela Universidade Estadual Paulista – UNESP, servindo presentemente no Centro de Hidrografia da Marinha – CHM. Email: guilherme.nascimento@marinha.mil.br.

Keywords: shoreline, mesotidal environment, Sentinel, prediction, tidal

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui linhas de costa que somam 10.959 km de extensão, de acordo com o Atlas Geográfico das Zonas Costeiras e Oceânicas do Brasil (IBGE, 2011). Diversos autores divergem quando o objetivo é defini-la, sendo tal fato decorrente da complexidade dessa feição geográfica que, em alguns casos, pode variar dezenas de metros em um único dia, ou, em outros, apresentar pouca alteração por longos períodos.

De maneira geral, a análise da variação da linha de costa e da tendência da dinâmica geomorfológica costeira é fundamental para uma ampla gama de investigações realizadas por cientistas, engenheiros e gestores costeiros (BOAK; TURNER, 2005; ALTINUC; KeçELI; SEZGER, 2014). Dentre os desafios de cada um desses profissionais, está a devida seleção das fontes de dados, escala de tempo e modelos, de acordo com as características dos fenômenos a serem considerados nos estudos sobre a dinâmica da linha de costa (VOS *et al.*, 2019).

Isso se dá em especial nas regiões onde ocorre a mesomaré (variação de maré com amplitude de aproximadamente 3 metros). Nessas áreas, a depender da declividade do perfil de praia, é possível observar com maior intensidade os efeitos da maré astronômica na linha de costa. No Brasil, essa dinâmica ocorre principalmente na região equatorial (FRANCO, 2009; PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020).

Nesse contexto, estudar técnicas para análise da linha de costa que estejam associadas à dinâmica de maré é um desafio necessário para a definição dos limites entre terra e água.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é estimar a linha de costa para uma época de referência em ambiente de mesomaré, com o emprego de imagens ópticas orbitais e dados maregráficos com datas anteriores à data a ser estimada (predição).

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um método para extração de linha de costa a partir de medidas sobre imagens ópticas orbitais;
- Desenvolver um método de análise estatística e visual dos resultados; e
- Validar os métodos propostos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados se resumem em imagens orbitais multiespectrais, dados de altura de maré obtidos para a área de interesse, um microcomputador dotado do *software* QGIS 3.24, um interpretador para a linguagem de programação *Python* 3.9 e o ambiente de desenvolvimento *PyCharm* 2021.2.3 9 *Community Edition*, além de bibliotecas específicas para a aplicação desejada.



A área de interesse (AOI) se localiza em Fortaleza-CE e consiste na faixa de areia com extensão de 7,5 km, que se inicia ao sul, na foz do rio Cocó, e segue até um enrocamento na sua extremidade ao norte, no bairro Cais do Porto, como mostrado na Figura 1.

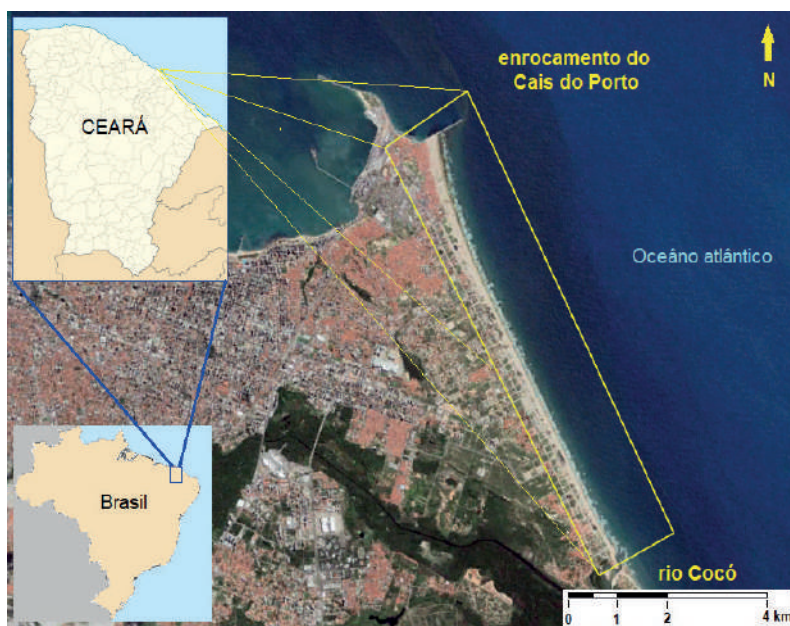


Figura 1 – Área de interesse - Fortaleza – CE. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A localização da AOI nas proximidades da linha do Equador (latitude de $03^{\circ} 45'$) confere uma das características de um ambiente de mesomaré (ALBUQUERQUE *et al.*, 2009) e possibilita a detecção dos efeitos da maré astronômica (FRANCO, 2009; PEREIRA; CONCEJO; TRINDADE, 2020; VOS *et al.*, 2019) na linha de costa através de imagens orbitais.

A aquisição das imagens orbitais da plataforma Sentinel pode ser realizada utilizando o portal da internet *Copernicus Open Access Hub da European Space Agency* (ESA), disponível no link: <https://scihub.copernicus.eu/>. Entretanto, nesse estudo, a utilização das imagens se deu

no ambiente da plataforma *Google Earth Engine*, que pode ser configurado por meio do link: <https://code.earthengine.google.com/>.

As informações básicas utilizadas como entrada para requisição das imagens desejadas foram as datas de coleta, a coleção das Imagens (Sentinel-2) a área de interesse e as bandas espectrais (B3 – verde e B8 – infravermelho próximo).

As imagens orbitais utilizadas são provenientes do sensor *MultiSpectral Instrument* MSI, embarcado na plataforma Sentinel-2, da ESA (ESA, 2022). Essas imagens possuem resolução espacial de 10m, resolução temporal de 5 dias e resolução radiométrica de 12 bits.

A partir deste conjunto de 12 cenas, foram selecionadas as bandas espectrais 3 (verde) e 8 (infravermelho próximo) para a aplicação do índice espectral NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (DU Y *et al.*, 2016), para o realce do corpo d'água. O período de observação considerado foi de 75 dias, para que seja detectado apenas as variações de curto período, as datas e horários das imagens adquiridas estão listadas no Quadro 1. A cena mais recente (número 12) foi utilizada como referência para testar a capacidade dos modelos em prever a posição da linha de costa baseando-se em informações progressas.

Quadro 1 – Data e hora exata da aquisição das imagens utilizadas

Época	Data	Hora - UTC
1	13/06/18	13:02:46
2	23/06/18	13:02:47
3	28/06/18	13:02:45
4	08/07/18	13:02:45
5	13/07/18	13:02:48
6	18/07/18	13:02:45
7	02/08/18	13:02:47
8	12/08/18	13:02:46
9	17/08/18	13:02:40
10	22/08/18	13:02:46
11	27/08/18	13:02:38
12(referência)	01/09/18	13:02:45

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Os dados de altura da maré foram adquiridos por meio da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que disponibiliza informações das estações maregráficas permanentes em intervalos de 5 min. A Figura 2 mostra a Estação maregráfica de Fortaleza (EMFOR), instalada no cais do porto de Mucuripe, Fortaleza-CE, suas coordenadas são $03^{\circ}42'52.55''S$ de latitude e $038^{\circ}28'36.54''O$ de longitude em SIRGAS 2000.

A partir das imagens obtidas, inicia-se a etapa de extração das distâncias das linhas de costa instantâneas (LCI). O processo tem início na seleção da AOI a partir da cena Sentinel-2 até a geração da tabela com as distâncias medidas das LCI a partir de uma linha de base (LB), ao longo dos transectos, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 2 – Estação EMFOR que pertence à RMPG do IBGE. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



Figura 3 – Localização dos transectos utilizados. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

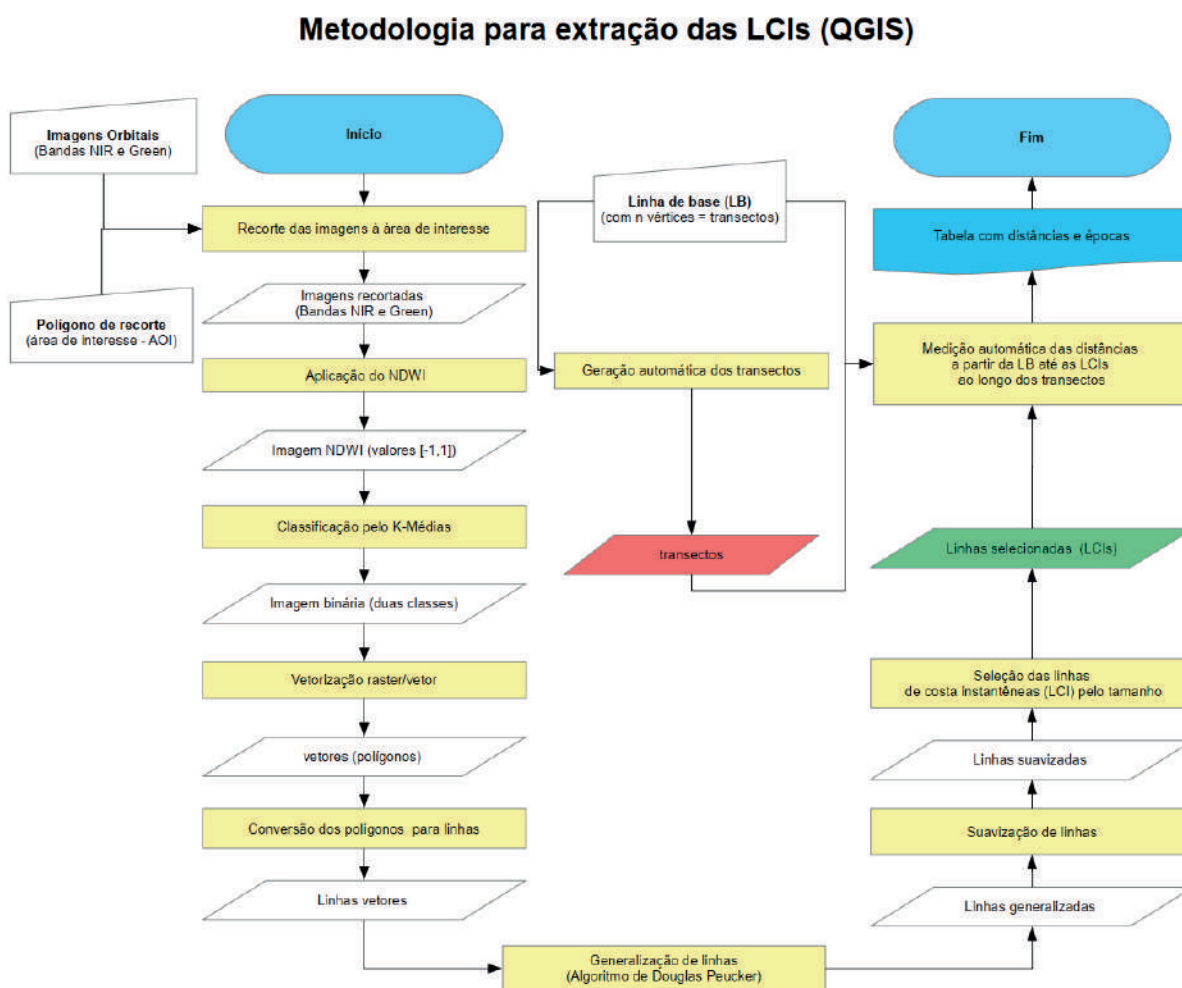


Figura 4 – Diagrama do processo de extração e medição das distâncias Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Para tanto, o método foi conduzido no *software* QGIS, com uma execução em 10 etapas, com cada etapa utilizando um *plug-in*, disponível em bibliotecas. A Figura 4 mostra as etapas na forma de um diagrama e as configurações utilizadas em cada etapa da extração

e medição das LCI estão resumidas no Quadro 2. Ao ser executado para todas as épocas, o produto final é um arquivo .csv, cuja primeira coluna é a data-hora, enquanto as demais elencam as distâncias medidas para cada época (linhas) ao longo de cada transecto.

Quadro 2 – Configurações utilizadas na etapa de extração das distâncias

Etapa	Descrição	Parâmetro / valor
1	Recorte das imagens à área de interesse	nenhum parâmetro
2	NDWI	nenhum parâmetro
3	Classificação por K-médias	número de classes = 2
4	Vetorização (raster/vetor)	nenhum parâmetro
5	Conversão de polígonos para linhas	nenhum parâmetro
6	Generalização de linhas	Douglas-Peucker; lim. = 10 m
7	Suavização de linhas	ângulo máximo = 80°
8	Seleção das LCIs	comp. $\geq 0,8 \cdot \text{comp. da LB}$
9	Geração automática dos transectos	tamanho dos transectos = 600 m
10	Medição das distâncias das LCIs à LB	nenhum parâmetro

O objetivo da previsão é estimar a LC para um instante em que se conhece sua verdadeira posição, denominada linha de referência (LR), com base na observação das LCI de épocas anteriores. Intuitivamente, quanto mais transectos, melhor será estimada tal linha de costa. Entretanto, alguns desafios como a presença de nuvens nas imagens ópticas orbitais limitam a quantidade de transectos que contenham as medições relativas a cada época. Nessa etapa, os dois modelos utilizados foram: regressão linear (RL) e projeção de maré observada (PMO).

3.1. Modelo de Regressão Linear (RL)

Na previsão da linha de costa por regressão linear, as variáveis dependentes são distâncias planas medidas ao longo de retas perpendiculares à LC, os transectos, que indicam a posição da linha de costa instantânea (LCI).

Essa distância plana $d(t)$, que representa a LCI no instante t , é medida a

partir de uma linha de base (LB) arbitrada (origem das distâncias). A variável independente é a própria época da observação t . Dessa forma, o modelo para a RL consta como o mostrado na Equação 1.

$$d(t) = at + b \quad (1)$$

onde:

$d(t)$: distância plana da LCI para um instante

t : instante da observação da LCI

a : coeficiente angular

b : coeficiente linear

Portanto, a regressão tem função de preditora quando a época da linha de referência LR é subsequente às épocas das LCI utilizadas para determinar os coeficientes a e b da Equação 1. Nesse modelo, quando são observadas mais de três LCI, o número de distâncias medidas $d(t)$ supera o número de coeficientes, o que torna possível estimar os coeficientes pelo do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) (GONCALVES *et al.*, 2012).



3.2. Modelo de Projeção da Maré Observada (PMO)

O modelo de projeção da maré observada (PMO) se baseia na correlação entre a altura da maré local e a distância planimétrica à LC observada nas imagens orbitais, em áreas onde a declividade $\tan\beta$ do perfil de praia permite tais observações. (VOS *et al.*, 2019). Apesar de ser possível estimar um valor que represente toda a região analisada como apresentado em VOS e colaboradores (2020), para cada perfil de praia existe um valor de declividade distinto, como ilustrado na Figura 5.

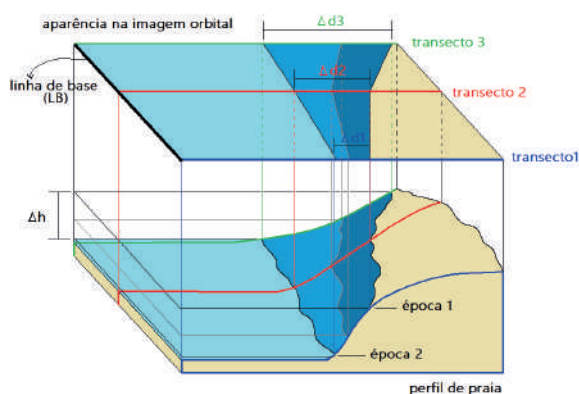


Figura 5 – Influência da declividade na distância horizontal em função da altura de maré. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A partir da Figura 5, pode-se observar que, para cada transecto, uma mesma variação de altura da maré Δh corresponde a diferentes medidas de distância plana Δd . Isso se dá em função da diferença de declividade $\tan\beta$. Esta relação geométrica é dada pela Equação 2.

$$\tan\beta = \frac{\Delta h}{\Delta d} \quad (2)$$

Para duas épocas distintas ($N=2$) é possível estimar a declividade do perfil de praia ao longo de um mesmo transecto. Já para períodos em que $N > 2$, tem-se a ocorrência de redundâncias. A estimativa de $\tan\beta$ pode ser então obtida a partir da raiz quadrada do quadrado dos valores médios de Δh e Δd , como o expresso na Equação 3.

$$\tan\beta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \Delta h_i^2}{\sum_{i=1}^N \Delta d_i^2}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2}{\sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2}} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h(t_i) - \bar{h})^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d(t_i) - \bar{d})^2}} = \frac{\sigma h}{\sigma d} \quad (3)$$

Por fim, conhecendo a declividade $\tan\beta$, é possível projetar a maré observada para estimar a posição da linha de referência LR em cada transecto, no instante t . Para tal, torna-se necessário somente conhecer a altura de maré em t . A Equação 4 demonstra a expressão da PMO.

$$d(t) = \frac{h(t) - \bar{h}}{\tan\beta} + \bar{d} \quad (4)$$

em que:

$d(t)$: distância plana da LCI para um instante t

$h(t)$: altura da maré observada para um instante t

$\tan\beta$: declividade do perfil de praia ao longo de um transecto

\bar{h} : média das alturas de maré observadas

\bar{d} : média das distâncias planas das LCI observadas

3.3. Análise dos erros

As estatísticas foram calculadas a partir do erro de previsão da última época

utilizada (2018-09-01), conforme mostrado na Equação 5. Os dados das demais 11 épocas foram utilizados para realizar os cálculos necessários à estimação das distâncias para a LRE a partir de cada modelo.

$$\mathbf{Erro}_{modelo} = \mathbf{d}'_{LRE-modelo} - \mathbf{d}_{LR} \quad (5)$$

em que:

\mathbf{Erro}_{modelo} : vetor de erros calculado para cada modelo

$\mathbf{d}'_{LRE-modelo}$: vetor das distâncias planas estimadas por cada modelo

\mathbf{d}_{LR} : vetor das distâncias planas observadas para a LR

Também foram analisados o gráfico e o histograma dos erros de previsão para cada transecto, com base na média,

desvio-padrão e na curva da função de densidade de probabilidade (f.d.p.) normal.

Além disso, foram selecionados três outros estimadores amplamente utilizados em estudos desse campo de pesquisas para avaliar o desempenho de cada algoritmo, sendo eles: raiz quadrada do erro médio quadrático RMSE (*Root Mean Square Error*); coeficiente de correlação (CC); e percentual médio do erro absoluto MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*). Para finalizar, a partir das distâncias, foram construídas as linhas de referência estimadas LRE por cada modelo. Essas linhas foram então comparadas à LR extraída da imagem, sobre uma composição colorida de imagens orbitais da época de referência, possibilitando a análise visual.

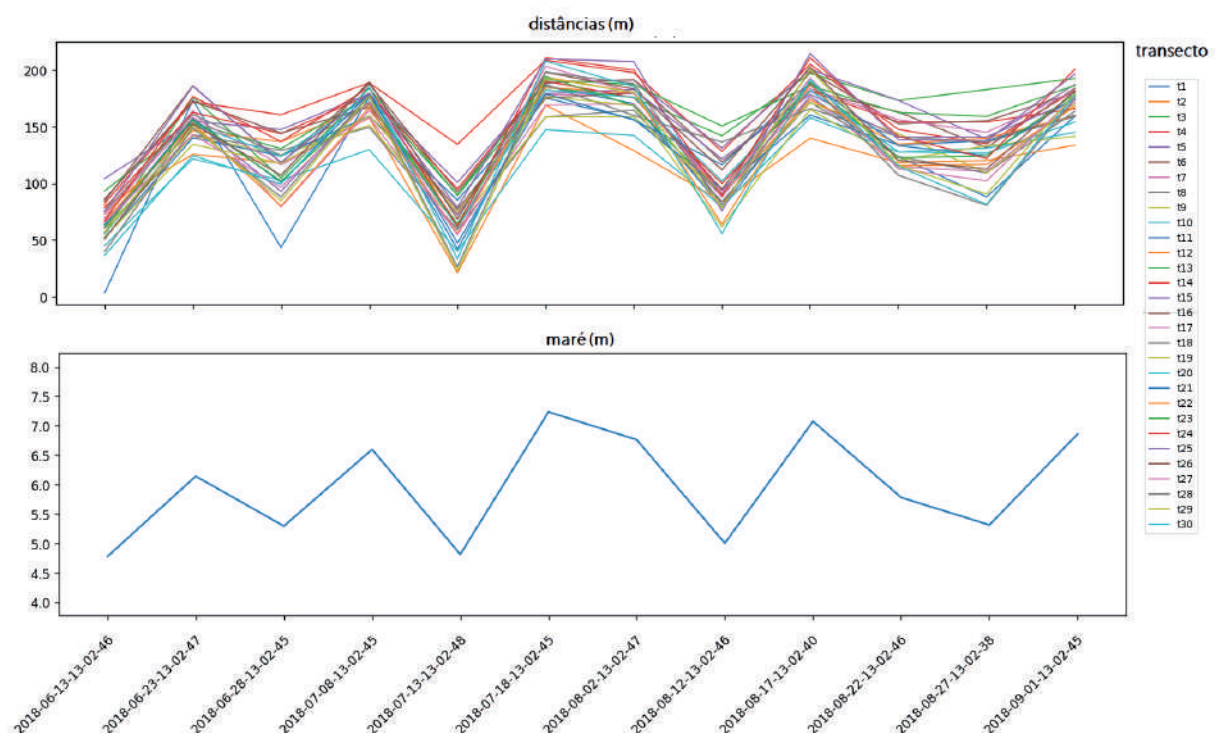


Figura 6 – Distâncias medidas em forma gráfica e altura de maré observada. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



4. RESULTADOS

4.1. Análise dos dados de entrada

A Figura 5 mostra na parte superior, as distâncias medidas, onde, no eixo das abscissas, são mostradas as épocas e, no eixo das ordenadas, é mostrado o valor medido em metros. Nesse gráfico, cada linha refere-se a uma amostra da LC (transecto). Na mesma figura, logo abaixo, é mostrado o gráfico da maré observada para as mesmas épocas (dentro do período de 75 dias observados).

A partir da Figura 6, é possível afirmar que a variação horizontal da linha de costa ao longo dos transectos é coerente com a variação vertical da maré local.

4.2. Análise dos resultados

A análise dos resultados foi conduzida por avaliação estatística dos erros e por verificação visual. A primeira teve como base o gráfico dos erros; o histograma dos erros das amostras; a função de densidade de probabilidade normal; os valores de média, desvio-padrão e as estatísticas RMSE, CC e de MAPE. Por fim, foi feita a análise visual da LC prevista para a

época de referência (2018-09-01) para os modelos RL e PMO.

O gráfico mostrado na Figura 7 contém o comportamento dos erros na estimação da linha de referência LR em metros (eixo das ordenadas) para cada amostra (eixo das abscissas). As linhas pretas pontilhadas indicam o intervalo de ± 20 m, o qual equivale a dois pixels na imagem orbital e equivale ao erro máximo da incerteza horizontal para linha de costa estipulado pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI). Observa-se que os modelos apresentaram tendências não maiores do que dois pixels nas imagens orbitais.

A Figura 8 mostra os histogramas dos erros. Destaca-se o modelo PMO como o mais acurado, pois teve os erros mais concentrados e aderentes à curva da f.d.p. normal.

O Quadro 3 mostra os valores calculados para as estatísticas dos erros, quais sejam: média μ , desvio-padrão σ , raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), coeficiente de correlação (CC) e percentual do erro médio absoluto (MAPE). Vale ressaltar que, enquanto o valor de CC, mostra o percentual de acerto, o MAPE mostra o percentual de erro médio absoluto. Portanto, quanto menor o valor de MAPE, melhor.

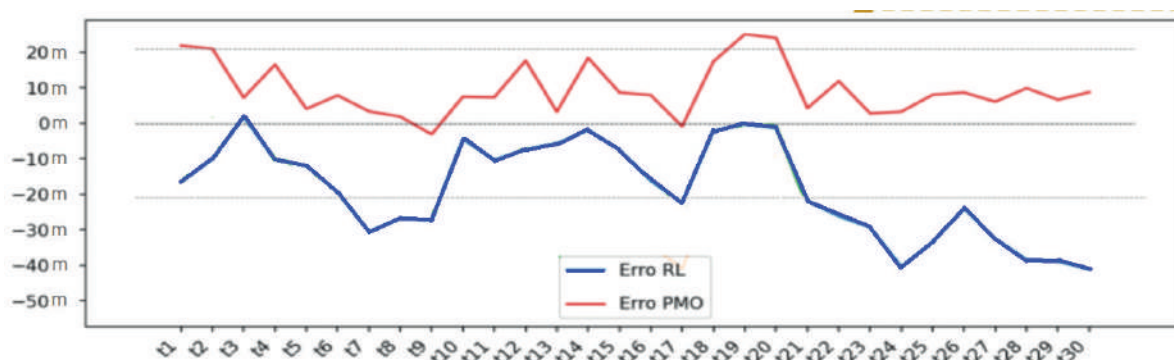


Figura 7 – Gráfico dos erros Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

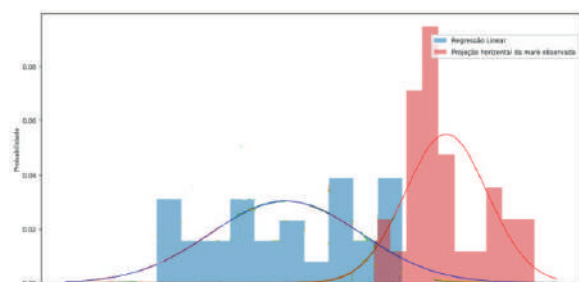


Figura 8 – Histograma dos erros. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Quadro 3 – Valores das estatísticas.

Estatística	Modelo RL	Modelo PMO
Média μ	16,5 m	15,19 m
Desvio-padrão σ	18,5 m	13,71 m
Raíz quadrada do erro médio quadrático RMSE	22,75 m	11,97 m
Coefficiente de correlação CC	63%	89%
Percentual do erro médio absoluto MAPE	11%	6%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

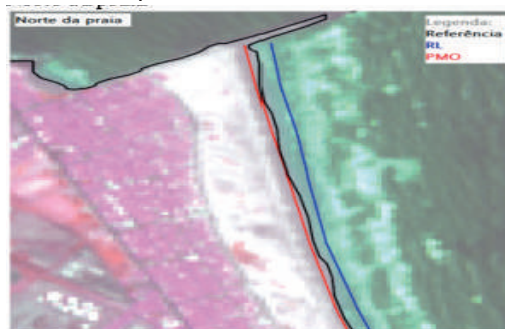
A análise do Quadro 3 destaca o modelo PMO como o mais acurado, com RMSE de valores próximos à metade daqueles do modelo de regressão linear.

Ademais o resultado alcançado com o modelo PMO tem acurácia compatível com o encontrado por Vos, 2019. Neste artigo foram analisadas as variações da linha de costa em 5 praias em diferentes escalas de tempo, para as quais o autor obteve um RMSE entre 7,3 m e 12,7 m, utilizando os produtos Sentinel e Landsat e um modelo otimizado de classificação de imagens baseado em redes neurais.

4.3. Análise visual das linhas de referência estimadas

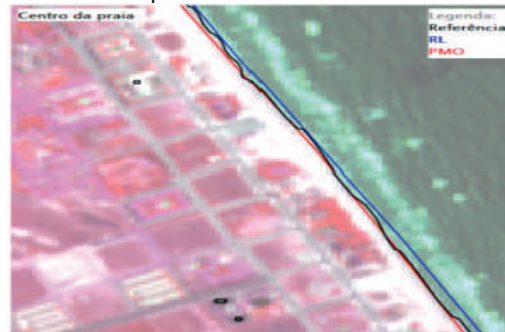
A Figura 9 apresenta três trechos da faixa de areia da AOI (norte, centro e sul).

Norte da praia



(a)

Centro da praia



(b)

Sul da praia



(c)

Figura 9 – Comparação das LC estimadas com a referência. Fonte: Elaborado pelos autores (2023)



Nesta figura, a imagem exibida ao fundo é a composição colorida falsa-cor do sensor MSI Sentinel-2 (bandas infravermelho, verde e azul, IRGB). A análise visual das linhas de referência estimadas (LRE) ou previstas confirma o resultado observado estatisticamente, a LRE prevista pelo modelo PMO (linha vermelha) foi a que mais se aproximou da LR (linha preta).

5. CONCLUSÕES

Com base na análise dos dados de entrada e após a realização dos experimentos, foi possível inferir que a metodologia para a extração da LC com emprego de ferramentas do *software* QGIS foi suficiente para extrair as LCI. O efeito visual da amplitude da maré pode não ser uniforme

para uma mesma faixa de areia, pois depende da declividade do perfil de praia, o que fez da determinação dessa declividade, um ponto importante do estudo.

Para a análise gráfica e de histograma, aferições estatísticas e análise visual, o modelo PMO se mostrou o mais adequado à estimação a linha de costa para uma época arbitrária, em ambiente de mesomaré, a partir do uso de imagens orbitais, com RMSE compatível com resultados de trabalhos publicados a nível internacional.

Portanto, foram alcançados nesse trabalho, os objetivos específicos de desenvolvimento, teste e análise de diferentes modelos para estimação da posição da LC, para situações onde a variação horizontal da maré é detectável em imagens orbitais.

6. REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Miguel da Guia Albuquerque; CALLIARI, Lauro Júlio; CORRÊA, Iran Carlos Stallivieri; PINHEIRO, Lidriana de Souza. *Morphodynamic of Futuro Beach, Fortaleza-CE: a synthesis of two years of study. Quaternary and Environmental Geosciences*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 49-57, 2009.

ALTINUC, S. O.; KECELI, A. S.; SEZER, E. A. *Semi-automated shoreline extraction in satellite imagery and usage of fractals as performance evaluator. International Journal of Computer Theory and Engineering*, v. 6, p. 102–106, 2014.

BOAK, E. e TURNER, I. *Shoreline definition and detection: A review. Journal of Coastal Research Journal of Coastal Research*, v. 21, p. 688–703, 2005.

DU Y., ZHANG Y., LING F., WANG Q., LI W., LI X. *Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. Remote Sensing*. v. 8(4), n. 354, 2016.



ESA, E. S. A. “*MultiSpectral Instrument (MSI)*”. disponível em: <<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/instrument-payload>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

FRANCO, A. S. Marés: Fundamentos, Análise e Previsão. 2. ed. Niterói: DHN, 2009

GONCALVES, R. M.; AWANGE, J. L.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; COELHO, L. dos S. A *comparison between three short-term shoreline prediction models. Ocean and Coastal Management*, v. 69, p. 102–110, 2012. ISSN 0964-5691. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0964569112001937>>.

IBGE. Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2011. ISBN 978-85-240-4219-5.

PEREIRA, L.; CONCEJO, A. V.; TRINDADE, W. 5 - *tidal modulation*. In: JACKSON, D. W.; SHORT, A. D. (Ed.). *Sandy Beach Morphodynamics*. Elsevier, 2020. p. 87–101. ISBN 978-0-08-102927-5. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081029275000059>>.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; SIMMONS, J. A.; TURNER, I. L. *Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coastal Engineering*, v. 150, p. 160–174, 2019. ISSN 0378-3839. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383918305313>>.

VOS, K.; HARLEY, M. D.; SPLINTER, K. D.; WALKER, A.; TURNER, I. L. *Beach slopes from satellite-derived shorelines. Geophysical Research Letters*, v. 47, n. 14, p. e2020GL088365, 2020. E2020GL088365 2020GL088365. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL088365>>.





IMPACTO DA MARÉ METEOROLÓGICA NO NÍVEL DO MAR PARA A BAÍA DE SEPETIBA-RJ

Eduarda Pinto Borba^{1*}
Gregório Luiz Galvão Teixeira^{2*}
*Alessandro Mendonça Filippo*³

RESUMO

A proposta desse trabalho é ampliar o conhecimento sobre as oscilações da Maré Meteorológica (MM) em situações extremas na Baía de Sepetiba – RJ, por meio da caracterização desse fenômeno e sua relação com os sistemas sinóticos. Os dados de nível do mar foram adquiridos no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM). Os dados de reanálise (vento e pressão) foram do ERA-5. Os dados utilizados se referem ao período entre os anos de 2014 a 2015. Para tal, o dado aplicado foi a subtração da maré prevista do nível observado para se obter o nível não-Astronômico. A MM foi obtida por intermédio da filtragem no domínio da frequência por meio da Transformada inversa de Fourier. O algoritmo de detecção de extremos de picos e cavados da MM foi aplicado com uma estatística aplicada que detecta valores acima de 95%. Por fim, foi feita uma análise conjunta desses períodos dos extremos da MM com os dados de reanálises. O tempo resposta entre os extremos

¹ Oceanógrafa e mestranda em Oceanografia Física pela UERJ. Email: eduardapborba@gmail.com

² Oceanógrafo físico e mestre em Eng. Ambiental pela UFES, Professor de Oceanografia, Marés e Geologia e Geofísica do CIAARA. Email: gregorio.luiz@marinha.mil.br

³ Oceanógrafo pela UERJ, mestre e doutor em Geociências pela UFF, Professor Associado do Depto. Oceanografia Física e Meteorologia da Faculdade de Oceanografia da UERJ.

de pressão e MM foi, em média, de 43 horas. A taxa de variação da MM e da pressão, em média, foram, respectivamente, de 0,66 cm e 0,14 hPa. Verificou-se que quanto menor o tempo resposta, maior a variação da MM. Este trabalho buscou mostrar a quantificação de parâmetros da MM por meio de um método simples, o que permitirá que essa quantificação possa ser replicada e possa servir de referência para outros estudos. O conhecimento destes parâmetros é de suma importância na tomada de decisão quanto à segurança da navegação, uma vez que a MM impacta diretamente na previsão de maré e na definição dos níveis de redução.

Palavras-chave: Maré Meteorológica, Níveis Extremos, Tempo Resposta, Taxa de variação, Transformada Inversa de Fourier, Baía de Sepetiba.

ABSTRACT

This work aims to expand the knowledge about the Meteorological Tide (MM) oscillations in extreme situations in Sepetiba Bay - RJ, through the phenomenon characterization and its relationship with the synoptic systems. The sea level data was obtained from the National Oceanographic Data Center (BNDO) of the Navy Hydrography Center (CHM). The reanalysis data (wind and pressure) were from the ERA-5. The data used refer to the period between the years 2014 to 2015. To this end, the predicted tide was subtracted from the measured level to obtain the non-astronomical level. The MM was obtained by filtering in the frequency

WWdomain through the inverse Fourier transform. The algorithm for detecting extremes of peaks and troughs of MM was applied together with an applied statistic that detects values above 95%. Finally, a joint analysis of these periods of the extremes of the MM was made with the reanalysis data. On average, the response time between the extremes of pressure and MM was 43 hours. The rate of variation of MM and pressure on average were respectively 0.66 cm and 0.14 hPa. It was found that the shorter the response time, the greater the variation of MM. This work sought to show the quantification of MM parameters through a simple method, which will allow this quantification to be replicated and serve as a reference for other studies. Knowing these parameters is of paramount importance in decision-making regarding navigation safety, since the MM directly impacts the tide forecast and the definition of reduction levels.

Keywords: Meteorological Tide, Extreme Levels, Time Response, Rate of variation, Inverse Fourier Transform, Sepetiba Bay.

1. INTRODUÇÃO

A oscilação do nível do mar é influenciada por diversos processos astronômicos e meteoceanográficos desencadeados por forçantes. A compreensão desses processos e suas forçantes, torna-se fundamental para o planejamento de obras costeiras de defesa contra possíveis eventos ambientais extremos, visto que metade da população global vive a 100 km do mar (PUGH; WOODWORTH, 2014).



Além disso, grande parte das maiores cidades do mundo estão localizadas na zona costeira ou próximas a ela, e as consequências na infraestrutura dessas cidades afetariam também os 90% do comércio global transportado pelo mar (PUGH; WOODWORTH, 2014).

O nível não-astronômico (NnA) corresponde a uma variação do nível do mar, causada principalmente por efeitos meteorológicos. A atmosfera pode induzir variações no nível do mar em escalas de tempo que vão desde minutos a anos, o que faz com que o NnA englobe diversas frequências (MELO F^o, 2017). Comumente, essa oscilação é correlacionada com os regimes de ventos na superfície do mar e com a variação da pressão atmosférica nos oceanos (MELO F^o, 2017).

O NnA, ao contrário da maré astronômica, apresenta baixa previsibilidade. Para obtê-lo a partir de dados de um marégrafo, basta subtrair a série temporal da maré prevista do nível observado (MELO F^o, 2017; PUGH, 1987). Isso resultará em valores positivos (sobre-elevações) e negativos (rebaixamento), que têm como origem forçantes não-astronômicas. A sobre-elevação pode causar inundações urbanas, destruição de estruturas costeiras, assoreamento de canais, acidentes de navegação, inundações de píeres e marinas, rompimento de amarras de barco, entre outros. O rebaixamento pode causar danos às embarcações, como encalhamentos, pois a maré fica abaixo do nível de redução (COELHO; TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2016; PUGH, 1987). Em águas rasas esse conhecimento preciso da altura da água em relação ao fundo possibilitará uma navegação segura das embarcações.

Segundo MELO F^o (2017), os períodos da banda do NnA no espectro vão de 2 horas a 1 ano. Este autor decompõe o NnA em 3 sub-bandas, a saber: a Sazonal, a Meteorológica e a de Tempestade, em faixas de períodos de 1 ano a 30 dias, de 30 a 3 dias e de 3 dias a 2 horas, respectivamente. Devido ao NnA apresentar componentes de natureza não-determinística, trabalhos como de MELO F^o (2017) e NETO (2021) mostram que é possível obter uma série temporal apenas com as frequências de interesse com Transformada Inversa de Fourier (FTIF) (THOMPSON; EMERY, 2014) e com filtros digitais (FRANCO, 2009; THOMPSON, 1983).

As previsões da maré astronômica que se encontram nos cálculos das Tábuas de Maré em alguns casos tornam-se irrelevantes, pois os valores de altura do nível do mar observado podem diferir significativamente do nível de maré prevista, devido aos efeitos meteorológicos (FUCHS; TEIXEIRA; NZUALO (2021); MELO F^o, 2017). Apesar da importância das forçantes astronômicas, há locais, tais como Rio Grande, em que as análises espectrais da maré mostram uma energia mais significativa nas frequências da banda não-astronômica do nível do mar e uma diminuição na energia das frequências astronômicas (MELO F^o, 2017; PUGH, 1987). Isso revela a importante influência que a intensidade e a duração dos efeitos meteorológicos têm sob a oscilação do nível do mar, assim como as características topográficas do local, visto que, quando as forçantes atuam em águas rasas, seus efeitos são intensificados, (NUNES, 2007; PUGH, 1987).

As zonas costeiras sofrerão maior impacto das variações do nível do mar quando houver a conjunção de ressacas com maré astronômica em períodos de sizígia, havendo mais parte alagada para a onda se deslocar. Essa combinação aumenta a probabilidade de danos à costa e à população, principalmente sobre regiões costeiras de baixo gradiente topográfico e densamente povoadas (PUGH, 1987).

Nessa perspectiva, é de extrema importância a realização de pesquisas sobre as oscilações da maré meteorológica (MM) para ampliar o conhecimento na costa brasileira, em particular na região sul e sudeste, onde a componente não-astronômica tem uma importância significativa no nível do mar (MELO F^o, 2017; FUCHS; TEIXEIRA; NZUALO, 2021). Além do mais, estudos na região referida nesse trabalho tornam-se interessantes, uma vez que o fenômeno de maré meteorológica, em momentos extremos, pode amplificar o rebaixamento e a sobre-elevação do nível do mar, assim como em ambientes portuários, uma vez que a maré meteorológica pode trazer riscos à navegação e limitar as operações portuárias.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Caracterizar a Maré Meteorológica em situações extremas na Baía de Sepetiba – RJ

2.2. Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral, foram definidos objetivos específicos, a saber:

- Reconhecer os extremos da MM;
- Relacionar os casos extremos da MM com processos Meteoceanográficos;
- Calcular o tempo resposta entre a MM e a Pressão ao nível médio do mar (PNMM);
- Calcular as Taxas de variação da MM e da PNMM.

3. DADOS E MÉTODOS

3.1. Área de Estudo

O sistema estuarino Baía da Ilha Grande e Baía de Sepetiba (SEBIGS) representa a transição entre o litoral rochoso da Serra do Mar e as planícies sedimentares da Baixada Fluminense a leste (RUELLAN, 1944; ALMEIDA, 1976; ASMUS e FERRARI, 1978; FERRARI, 1990 apud KJERFVE *et al.*, 2021). A região de estudo está localizada na Plataforma Continental Sudeste Brasileira (PCSE), que é delimitada pelos Cabo Frio (23°S), no Rio de Janeiro, e de Santa Marta (28° 40' S), em Santa Catarina, estendendo-se desde a costa até a sua borda, entre as isóbatas de 100 m e 200 m, e possui orientação predominante na direção NE-SW, com comprimento aproximado de 1.100 km (COELHO, 2010). Esse sistema tem uma área de 775 km² e se estende 120 km ao longo de um eixo oeste-leste. A BS tem uma área de 305 km² e uma largura máxima de 15 km (KJERFVE *et al.*, 2021), limitada pela Serra do Mar à nordeste, pela Serra de Madureira ao norte, pelo maciço da Pedra Branca à sudeste e pela Restinga da Marambaia ao Sul (ROCHA *et al.*, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2017). A BS tem relevância social, econômica e



política devido à Base de Submarinos da Marinha, a outros três portos ou terminais instalados em seu interior (TEIXEIRA *et al.*, 2016) e a diversas plantas industriais localizadas nessa baía. Esse complexo estuarino possui um alto potencial pesqueiro e turístico, além de ser um criadouro natural para diversas espécies por conta de sua extensa área de mangue e estuários (CREED *et al.*, 2017; TORQUETI, 2019).

A principal forçante hidrodinâmica é a maré local (ALVES, 2009; SIGNORINI, 1980), com a presença de variações não astronômicas devido às variabilidades meteorológicas, como as frentes frias polares. Estas últimas são reflexos do clima local, ocorrendo principalmente durante o inverno (CAVALCANTI; KOUSKY, 2009; DERECZYNSKI *et al.*, 2022; KJERFVE *et al.*, 2021)

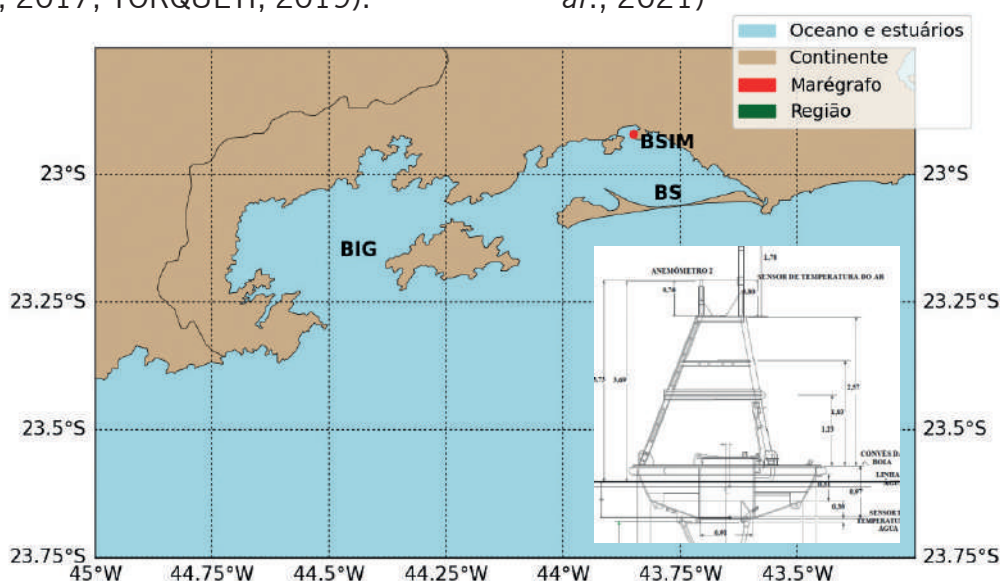


Figura 1 – Mapa da localização geográfica da área de estudo adjacente da Estação Maregráfica Base de Submarinos da Ilha da Madeira (EMBSIM) que está localizada no SEBIGS

3.2. Dados

Como já citado anteriormente, as elevações do nível de mar foram obtidas na EMBSIM, localizada na Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro. A estação em questão é dotada de um marégrafo de boia e contrapeso. Os dados de alturas do nível do mar (NM) observados abrangem os anos de 2014 e 2015. Estes dados foram adquiridos através do Banco Nacional de Dados Oceanográficos, do Centro de Hidrografia da Marinha (BNDO/CHM), e possuem uma taxa de amostragem horária, resultando em 8782 elementos

de altura. Os dados de vento a 10 m da superfície nas componentes u e v e da PNMM foram obtidos pelo banco de dados de reanálise do ERA5 (ECMWF e *Analysis*), no mesmo período dos dados de NM.

3.3. Nível não-astronômico

Após obtenção da curva da maré astronômica (previsão harmônica), foi utilizada a metodologia de MELO F^o (2017) para a obtenção do nível não-astronômico. O autor afirma que para obter o NnA

num certo maregrama basta subtrair a maré astronômica (previsão harmônica) da maré observada local ($NM(t)$).

$$NnA(t) = NM(t) - Na(t)$$

equação (1)

3.4. Transformada de Fourier (TF)

Para se entender o fenômeno conforme o espectro, o intervalo de todas as possíveis frequências de cada sub-banda não-astronômica, também analisado como o espectral de energia (MELO F^o, 2017), foi necessário transformar o sinal que estava, anteriormente, no domínio do tempo para o domínio da frequência. Para tal finalidade, usou-se o método TF. Desse modo, foi possível decompor, quantificar e avaliar as diferentes componentes do sinal não-astronômico, por meio da distribuição de energia ao longo de todas as suas componentes, e determinar os limites de frequência da banda de interesse. Este trabalho utilizou como referência o intervalo proposto por MELO F^o (2017).

3.5. Transformada Inversa de Fourier (TIF)

A sub-banda MM tem os limites estabelecidos entre 30 dias e o Período Inercial (PI_{inercial}). Para definir os limites de frequência da MM, foi calculado o PI_{inercial} local (equação 2) para a latitude 22° 55,9' W, na qual o marégrafo da BSIM está localizado (CSANADY, 1982; MELO F^o, 2017).

$$P_{Inercial} = \frac{2\pi}{f}$$

equação (2)

Após definir esses limites da MM (Tabela 1), essa informação será utilizada como referência para obter a curva desse fenômeno através da TIF. Esse método irá recompor o sinal de Fourier, isto é, reconstituir a curva da MM de acordo com os limites estabelecidos (MELO F^o, 2017).

Tabela 1: Período Inercial calculado para a latitude local

	Latitude	Tinercial	Frequência (cpd)	Dias
BSIM (RJ)	22,93°	30,8003	0,7792	1,28

3.6. Reconhecimento de Extremos

Para identificar os extremos de sobre-elevação e rebaixamento, foi calculada a média aritmética destes extremos e calculado o intervalo de confiança para a média das sobre-elevações ($\bar{x}_{cristas}$) e dos rebaixamentos (\bar{x}_{cavas}), separadamente. O reconhecimento dos extremos seguiu as seguintes condições:

$$Se, MM \geq \bar{x}_{cristas} + 1,96 \sigma_{MMcristas} = \text{Extremo de sobre - elevação}$$

$$Se, MM \leq \bar{x}_{cavas} - 1,96 \sigma_{MMcavas} = \text{Extremo de rebaixamento}$$

Os valores inferiores ou iguais às \bar{x}_{cavas} , serão os extremos de rebaixamento e valores superiores ou iguais às $\bar{x}_{cristas}$, serão os extremos de sobre-elevações. A estimativa com 95% de confiabilidade se deu partir de uma função com base no cálculo de derivadas para obter uma estimativa mais conservadora de ambos os extremos (SPIEGEL; SCHILLER; SRINIVASAN, 2004).



3.7. Tempo Resposta (TR) e Taxa de Variação (TV)

Para caracterizar a MM será calculado o Tempo Resposta da variação máxima da MM, devido à variação máxima da pressão durante os rebaixamentos (Tr_r) (equação 3) e sobre-elevações (Tr_s) (equação 4). Também será calculada a taxa de variação da MM (TVMM) (equações 5 e 6) e da pressão (TVP) (equações 7 e 8) durante os rebaixamentos (r) e sobre-elevações (s).

$$Tr_r = t_{cavaMM} - t_{cristapressão} \quad \text{equação (3)}$$

$$Tr_s = t_{cavaMM} - t_{cristapressão} \quad \text{equação (4)}$$

$$TVMM_s = \frac{\Delta MM_{cava-crista}}{\Delta t_{cava-crista}} \quad \text{equação (5)}$$

$$TVMM_r = \frac{\Delta MM_{crista-cava}}{\Delta t_{crista-cava}} \quad \text{equação (6)}$$

$$TVP_s = \frac{\Delta P_{crista-cava}}{\Delta t_{crista-cava}} \quad \text{equação (7)}$$

$$TVP_r = \frac{\Delta P_{cava-crista}}{\Delta t_{cava-crista}} \quad \text{equação (8)}$$

3.8. Estatística

O conjunto de dados da série foi utilizado para avaliar estatisticamente a relação entre a Maré Meteorológica e a PNMM.

3.9. Correlação de Pearson

O uso do coeficiente de correlação determina a relação entre duas propriedades. O coeficiente pode variar de +1 a -1. O valor de correlação mais próximo a 1,

indica forte correlação. Já mais próximo de zero, indica correlação fraca. Nesse trabalho, correlacionamos os métodos entre si, em função da covariância, de dois em dois, para avaliar se há uma relação linear, mais próximo a 1, entre os níveis não-astronômicos.

A equação para o coeficiente de correlação é:

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad \text{equação (9)}$$

Onde: \bar{x} e \bar{y} são as médias da amostra MÉDIA (matriz1) e MÉDIA (matriz2).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir do cálculo do Período Inercial local para a BSIM (latitude = 22 93°), os limites de frequência da subdivisão do NnA foram estabelecidos. Os limites da MM foram de 0,033 a 0,779 cpd para a região de estudo. A partir do conhecimento dos limites de frequências de cada sub-banda, foi reconstituída a curva de cada uma delas por meio da TIF.

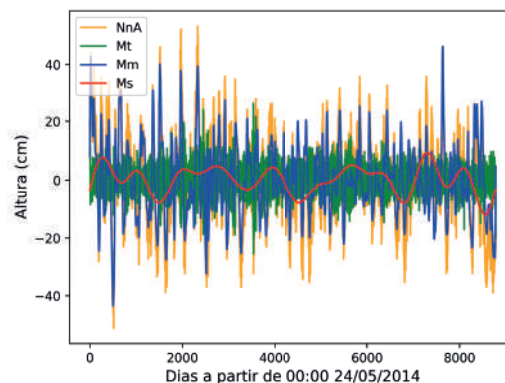


Figura 2 – Gráfico da série temporal do Nível não-Astronômico (NnA) junto das suas 3 sub-bandas reconstituídas pela TIF. Mt = Maré de Tempestade; Mm = Maré Meteorológica; Ms = Maré Sazonal

De modo a quantificar os eventos extremos, ou seja, os eventos que estão acima da média dos picos, e os eventos que estão abaixo da média das cavas, foi utilizado o método de reconhecimento de extremos. A figura 3 representa os 25 extremos de cristas e cavas da MM. Nesta figura os pontos de reconhecimento das datas 05/05/2015 e 08/05/2015, de sobre-elevação, e 22/05/2015 e 24/05/2015 de rebaixamento estão sobrepostas. Os círculos roxo e rosa foram ampliados para uma melhor visualização dos 25 extremos, 13 cristas e 12 cavas.

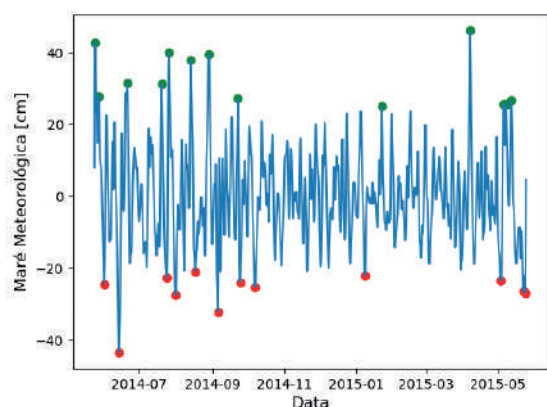


Figura 3 – Extremos de sobre-elevação e rebaixamento da Maré Meteorológica com 95% de confiabilidade obtidos através do método de reconhecimento de extremos

Após o reconhecimento dos 25 extremos, foi realizada a análise conjunta dos dados da MM com os dados de vento e pressão filtrados na banda meteorológica. Na figura 4 está representada essa análise para o caso mais extremo de rebaixamento. A MM atingiu -43,469 cm. Assim, foi possível calcular as variações entre as cavas e os picos da pressão e da MM, como demonstrado na figura 5. Além de observar os ventos favoráveis durante os casos de rebaixamento e sobre-elevação.

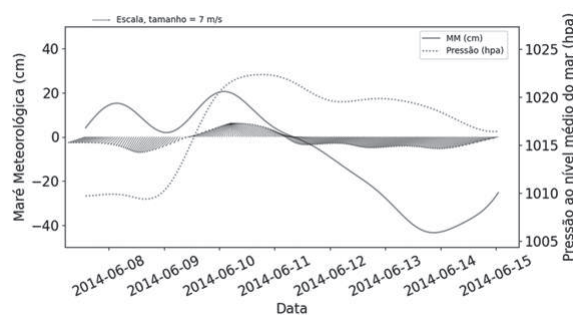


Figura 4 – Gráfico da análise conjunta das variáveis MM, PNMM e vento do caso 1 de rebaixamento

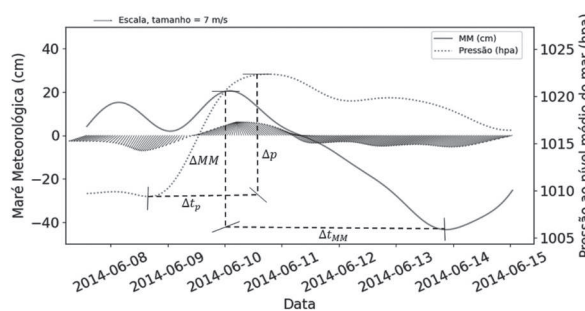


Figura 5 – Gráfico da análise conjunta das variáveis MM, pressão e vento do caso 1 de rebaixamento, exemplificando o cálculo da variação do mínimo até o máximo da pressão no tempo e da variação do máximo até o mínimo da MM no tempo

Além das análises conjuntas, foram calculadas as taxas de variação e tempos de respostas entre as variáveis pressão e MM, uma vez que essas variáveis podem ser utilizadas na análise primária da dinâmica do processo, que advém da resposta da MM frente a ação da pressão. Os resultados desses cálculos se encontram apresentados na Tabela 2. Esses cálculos não foram realizados para o caso 2 de sobre-elevação por conta da ausência de dados pretéritos do nível do mar, não sendo possível analisar as cavas e cristas anteriores da MM e da pressão, respectivamente.



Tabela 2: Casos de sobre-elevação (S) e rebaixamento (R) com seus respectivos tempos de resposta (TR), taxa de variação da MM (TVMM) e taxa de variação da pressão (TVP)

Casos		TR (dias)	TVMM (cm/dia)	TVP (hpa/dia)
Caso 2	S	-	-	-
Caso 1	S	0,83	22,80	3,60
Caso 3	S	1,17	30,72	3,60
Caso 4	S	2,96	16,56	2,16
Caso 5	S	0,75	26,64	2,40
Caso 6	S	3,38	11,52	1,68
Caso 7	S	1,29	24,00	2,64
Caso 8	S	0,88	13,44	4,80
Caso 9	S	2,21	16,56	3,36
Caso 10	S	0,67	16,56	4,56
Caso 11	S	0,71	11,76	3,12
Caso 12	S	1,42	21,84	3,60
Caso 13	S	1,58	19,44	2,40
Caso 1	R	3,08	16,80	6,72
Caso 2	R	0,25	21,36	6,96
Caso 3	R	2,46	12,72	6,72
Caso 4	R	2,08	7,44	1,20
Caso 5	R	0,75	10,32	1,44
Caso 6	R	1,58	9,60	0,72
Caso 7	R	1,88	11,04	1,92
Caso 8	R	1,58	28,32	3,12
Caso 9	R	2,92	11,04	1,68
Caso 10	R	3,96	1,68	2,64
Caso 11	R	1,83	12,72	1,68
Caso 12	R	3,04	4,56	10,56

Os casos extremos tiveram um tempo resposta médio de 43 horas, a taxa de variação da MM e da pressão, em média, foi de 0,66 cm/hora e 0,14 hPa/hora, respectivamente. Na TVMM ocorreu uma diferença das taxas de variação de rebaixamento (12,30 cm/dia) e de sobre-elevação (19,32 cm/dia), isso pode estar relacionado com a intensidade dos ventos de SW relacionados com as passagens das frentes frias.

O tempo resposta médio (TR) de 1,80 dias indica que a variação máxima da MM, devido à variação máxima da pressão, é esperada após este período. O valor do TR calculado é superior ao $T_{Inercial}$, o que pode estar relacionado ao fato de que este processo é influenciado pelo efeito de rotação da Terra.

A correlação, em média, do TR com as taxas de variação da MM e da pressão mostrou que o TR e a pressão apresentam uma correlação pequena positiva (0,06), sendo este valor de correlação não significativo. Já a correlação entre a TR e a MM apresentam uma correlação de - 0,54. Este valor sinaliza uma relação inversa, portanto, menores tempos de respostas estão relacionados com maiores taxas de variação da MM.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo a caracterização da Maré Meteorológica frente aos processos meteocinográficos. Em relação ao tempo resposta da MM e da pressão ao largo, espera-se em média 1,80 dias. A taxa de variação média da MM foi de 15,84 cm/dia, ocorrendo uma diferença significativa das taxas de variação de rebaixamento (12,30 cm/dia) e de sobre-elevação (19,32 cm/dia). Com estes resultados é possível ter uma noção quantitativa de parte da dinâmica do processo de formação e propagação destas ondas, o que permite utilizar esses parâmetros em modelos conceituais ou servir-se deles como referência para comparação de resultados de modelos hidrodinâmicos ou analíticos. Este trabalho é fruto da parceria formada entre o CIAARA e o Departamento de Oceanografia Física e Meteorologia da UERJ para estudos relativos às oscilações do nível do mar e de suas correntes associadas. Estes resultados embasarão trabalhos futuros, como dissertações, teses e artigos oriundos desta parceria.



6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. *et al.* Análise das Marés Meteorológicas em Leixões. 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, n. Outubro, 2009.

ALVES, R.A. Variação Espacial da Relação entre as Amplitudes Harmônicas M2 e M4 das Correntes na Baía de Sepetiba-RJ. Anais Hidrográficos/ Diretoria de Hidrografia e Navegação, T.66, p 98-100. 2009.

CAVALCANTI, I.F.A.; KOUSKY, V.E. Frentes Frias Sobre o Brasil, In: CAVALCANTI, I.F.A (org,). Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. E-book, Cap.9: p. 135-147. 2009.

COELHO, A. Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em sede 18,69 anos. 2016.

COELHO, *et al.* Impacto do processo de ressurgência costeira no NR: Caso Baía de Sepetiba. Congresso Brasileiro de Oceanografia. Salvador-Bahia, 2016.

DERECZYNSKI, C.; VASCONCELLOS, F.; KAISER, J.; GALLO, M.; MELO, G.; SILVEIRA I.; DOTTORI, M. Projeto de Caracterização Regional da Bacia de Santos – PCR – BS: Meteorologia e Oceanografia Física da Bacia de Santos. Vol. 3, rev. 02, dezembro, 2022.

FRANCO, A. A., Marés: Fundamentos, Análise e Previsão. DHN, 2^a edição. Niterói, 2009.

KJERFVE, B.; DIAS, G.T.M.; FILIPPO, A.; GERALDES, M.C. *Oceanographic and environmental characteristics of a coupled coastal bay system: Baía de Ilha Grande-Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brazil. Regional Studies in Marine Science.* Elsevier, v.41, 2021.

MELO F^o, E. *Maré Meteorológica na Costa Brasileira.* 2017. 328p. Tese (Professor Titular), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio Grande, Rio Grande. 2017.

NEVES, C.; MUEBE, D. Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira. [s.l: s.n.].

PRATS, R. DE C. Avaliação e impactos da elevação do nível do mar no Porto de Santos (São Paulo, Brasil). p. 73, 2017.

PUGH, D. (1987) Tides, Surges and Mean Sea-Level. John Wiley, London.

SIGNORINI, S.R. *Study of the Circulation in Bay of Ilha Grande and Bay of Sepetiba: part II: an Assessment to the Tidally and Wind-driven Circulation Using a Finite Element Numerical Model, Brazilian Journal of Oceanography*, v. 29, nº.1, p 57-68. 1980. THOMPSON, R.O.R.Y. *Low-Pass Filters to Suppress Inertial and Tidal Frequencies. Journal of Physical Oceanography*, 1077- 1083, 1983.

THOMPSON, R.E., and EMERY, W.J. *Data Analysis Methods In Physical Oceanography.* Elsevier. 3^o edition. Oxford, 2014.



METODOLOGIA ALTERNATIVA PARA MEDIÇÃO DE OFFSET DE EMBARCAÇÃO COM SISTEMA MULTIFEIXE.

Bruno Neves Baptista

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para medição de afastamento de sensores instalados em embarcações dotadas de sistemas multifeixe para aquisição de dados batimétricos. A metodologia pode ser aplicada em navios ou lanchas de sondagem. A base teórica do método discutido neste artigo utiliza conceitos matemáticos de álgebra linear e ajustamento de retas e planos por método dos mínimos quadrados (MMQ). O resultado do método são diferenças lineares e angulares entre equipamentos e sensores do sistema de aquisição de dados multifeixe, em consonância com recomendações dos fabricantes.

Palavras-chave: Controle Dimensional, medição de offset, ecobatímetros multifeixe, método dos mínimos quadrados, ajustamento de planos e linhas.

ABSTRACT

This work presents a methodology for offsets sensors measurements of vessels

¹ Oficial do Corpo da Armada. Professor do Magistério Militar do CIAARA. Email:bruno.neves@marinha.mil.br

that have a multibeam system for bathymetric data acquisition. The methodology can be applied to ships or small survey vessels. The theoretical basis of the method discussed in this article uses mathematical concepts of linear algebra and best fit of lines and planes by least squares method (LSM). The result of the method is linear and angular differences between equipment and sensors of the multibeam data acquisition system, according to manufacturers' recommendations.

Keywords: Dimensional control, offset measurement, multibeam echo bathymeters, least squares method, best fit plane, best fit line.

1. INTRODUÇÃO

O controle dimensional, também conhecido como medição de *offsets*, é uma das últimas etapas da instalação de um sistema multifeixe. Consiste em conhecer, de forma precisa e sistematizada, as diferenças lineares e angulares entre sensores do sistema multifeixe em relação a uma referência convenientemente conhecida (Sistema de Coordenadas da Embarcação - SCE). Essa atividade deve ser realizada todas as vezes que houver alterações físicas no posicionamento dos sensores que compõem o sistema multifeixe, como remoção de transdutores, sensores inerciais, antenas etc. (KONGSBERG MARITIME AS, 2012).

As medições devem ser realizadas em dique seco, pois é necessário que a embarcação esteja estática e estabilizada. Adicionalmente, deve-se ter acesso às

faces dos transdutores instalados no casco e demais equipamentos internos, como o sensor de movimento e atitude (*Inertial Measurement Unit - IMU*). Caso os afastamentos lineares e angulares não sejam conhecidos ou seus valores extrapolem tolerâncias especificadas pelo fabricante, os dados adquiridos apresentarão inconsistências técnicas e não poderão ser aproveitados para atualização de documentos náuticos, sendo necessária uma nova docagem para o retrabalho de medição de *offsets* (KONGSBERG MARITIME AS, 2012).

Não há métodos de calibração que possam contornar erros grosseiros oriundos de *offsets* incorretos ou fora de tolerâncias técnicas. A calibração (*patch test*) apenas compensa os desvios residuais entre o sensor de atitude e movimento, e os transdutores (OHI, 2010). Por esses motivos, principalmente pela impossibilidade de realizar medições a qualquer tempo (apenas com navio docado), faz-se necessário um método simples, a ser realizado por uma equipe reduzida e independente.

O método proposto neste artigo independe de um plano de referência físico, como o *Master Level*, que consiste em uma chapa de aço, fixa à estrutura do navio e a partir dela são medidos os ângulos de caturro e banda da embarcação no dique. A sistemática proposta utiliza como referência o plano de flutuação da embarcação em condições normais de banda e trim, o que traz a conveniência para ser empregado quando a quilha não é paralela à linha d'água.

Por ocasião da instalação de um sistema multifeixe novo, há obrigações do



vendedor a serem realizadas no Teste de Aceitação no Porto (do inglês *Harbour Acceptance Test - HAT*). Dentre outros serviços, o fabricante não renuncia à utilização de empresa especializada e experiente para o controle dimensional, dado sua grande importância para a qualidade dos dados adquiridos. O presente artigo é um estudo da metodologia empregada por essas empresas (PARKER, 2014; OVERATH & SAND, 2015), sob uma ótica executiva, a fim de fomentar discussões sobre metodologias para controle dimensional.

2. METODOLOGIA

2.1. Conceito Geral

Como ponto de partida, o manual de instalação do ecobatímetro multifeixe *Kongsberg EM2040* define como plano aquele que melhor se ajusta à superfície de flutuação da embarcação. Esse plano matemático será utilizado como referência para medições angulares.

A origem do sistema cartesiano tridimensional da embarcação (Sistema de Coordenadas da Embarcação – SCE) pode ter sua origem estabelecida em um local físico ou teórico (KONGSBERG MARITIME AS, 2012), sendo usual que esse local coincida com o a base do sensor de movimento. A *IMU* é um sensor que mede ângulos e acelerações e, devido ao seu princípio de funcionamento, é desejável que esteja instalada próximo ao centro de gravidade do navio. Entretanto, não há obrigatoriedade que a origem seja na base da *IMU*, podendo outro local apropriado ser utilizado como referência

(OVERATH & SAND, 2015). Por conveniência, as direções desse sistema obedecem à regra da mão direita e adotam as seguintes orientações (Figura 1):

- i. Eixo X – Positivo apontando para a proa.
- ii. Eixo Y – Positivo apontando para boreste.
- iii. Eixo Z – Positivo apontando para baixo.

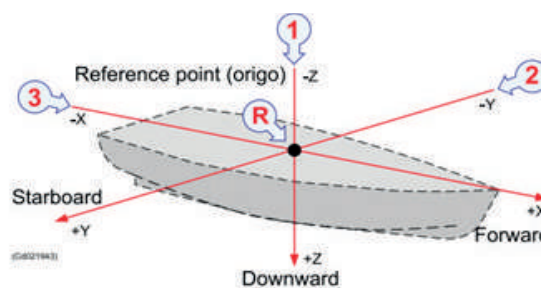


Figura 1 – Sistema de Coordenadas da Embarcação
(Fonte: Kongsberg Maritime)

Uma vez definidos os sentidos dos eixos do SCE, os valores das medições angulares obedecem ao sentido de rotação da “mão direita”, a saber:

- i. Rotação positiva no eixo X: movimento de Roll, com BB para cima.
- ii. Rotação positiva no eixo Y: movimento de Pitch, com proa para cima.
- iii. Rotação positiva no eixo Z: movimento de Yaw, com proa para boreste.

Até aqui tem-se uma definição qualitativa do plano de referência do SCE, porém há necessidade de um tratamento matemático formal que proporcione condições de extrair valores angulares e lineares. Antes de discutir como os planos e retas são definidos, serão brevemente apresentadas as técnicas utilizadas para a obtenção de coordenadas locais dos pontos interesse.

2.2. Obtenção das coordenadas locais dos pontos de interesse e suas representações

O Sistema de Coordenadas Local (SCL) é um plano topográfico nas proximidades da embarcação, com origem arbitrada. A orientação pode ser definida por conveniência e para facilitar a visualização espacial e coerência dos dados obtidos, recomenda-se que o eixo X possua aproximadamente a direção da proa da embarcação, porém não há obrigatoriedade técnica nesse aspecto, podendo até mesmo serem obtidas coordenadas na projeção UTM.

A obtenção de coordenadas é um trabalho topográfico clássico, realizado com apoio de Estação Total e deve empregar técnicas que promovam a maior acurácia possível. Neste artigo, não serão abordadas as metodologias topográficas empregadas, porém ressalta-se a importância de controle de erros e incertezas. Preferencialmente, deve ser estabelecida uma poligonal topográfica fechada e ajustada no perímetro da embarcação, com visadas para diversos pontos de interesse, por exemplo: linha d'água, linha de fé, *IMU*, transdutores, antenas e outros locais de interesse.

2.2.1. A quilha (Linha de fé)

A quilha materializa a linha de fé da embarcação, cuja direção será utilizada para posterior matriz rotação para transformação de coordenadas. Matematicamente, a direção da quilha é representada por um vetor, no plano XY do SCL. Há duas formas para determinar esse vetor:

i. Diferença entre duas coordenadas na quilha (Vante e Ré); e

ii. Ajustamento de uma reta que melhor se ajusta às diversas coordenadas obtidas na quilha.

Por se apoiar em apenas dois pontos, a primeira delas é substancialmente simples de se obter, porém pode conter erros na direção calculada, fruto de incertezas da medição, dificuldades topográficas para obtenção das coordenadas, ou desvios estruturais naturais da construção da embarcação. Por outro lado, quanto mais valores da quilha forem medidos (Figura 2), mais robusto será o valor final e esta será a técnica apresentada nesse artigo.

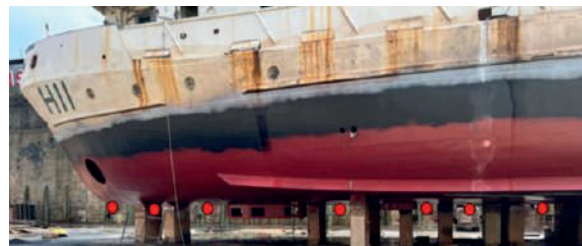


Figura 2 – Pontos de medição da quilha (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Dado que as coordenadas medidas da quilha (Q) são:

$$Q_k = (X_k, Y_k, Z_k) \quad (1)$$

A reta que melhor se ajusta ao conjunto de pontos Q_k das coordenadas no plano horizontal (plano XY) da quilha e seu respectivo vetor diretor é definida pela equação 2, onde \hat{y} e \hat{x} são os pontos pertencentes à reta em questão e o vetor $\vec{v}=(a,b)$ define a direção dessa reta.

$$\hat{y} = \frac{-a}{b} \hat{x} - \frac{c}{b} \quad (2)$$

$$\vec{v}=(a,b) \quad (3)$$



Entende-se que em uma situação real e prática é impossível ter mais de 3 pontos concorrentes na mesma reta, por isso deve-se empregar ajustamento pelo MMQ (MIKHAIL e GRADE, 1981) e obter a reta que melhor representa os pontos da quilha (equação 2), acrescido de um resíduo (e_n), que corresponde ao afastamento da reta a uma coordenada (equação 4).

$$y_n = \frac{-a}{b} x_n - \frac{c}{b} + e_n \quad (4)$$

O termo e_n é o desvio entre um ponto qualquer e a reta ajustada. Esse valor é o resíduo, isolando e_n e elevando ao quadrado teremos a equação 5:

$$P(a, b, c) = \sum_{n=1}^k e_n^2 \quad (5)$$

A função $P(a, b, c)$, expressa o somatório dos e_n^2 , em função das variáveis (a, b, c) :

$$P(a, b, c) = \sum_{n=1}^k e_n^2 \quad (6)$$

Para se obter o menor valor possível de $P(a, b, c)$, deve-se derivar dessa equação e calcular os resultados de (a, b, c) para seu mínimo. Como há três variáveis, faz-se necessário aplicar a derivada parcial (operador Jacobiano) para cada uma e igualar a zero cada equação obtida.

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0; \frac{\partial P}{\partial b} = 0; \frac{\partial P}{\partial c} = 0 \quad (7)$$

Tem-se então um sistema linear possível, com três equações e três incógnitas.

O resultado desta etapa será o vetor diretor:

$$\vec{v} = (a, b) \quad (8)$$

Transladando para o caso concreto, tem-se o vetor diretor da reta que melhor se ajusta à linha de fé da embarcação e deste vetor obtém-se o ângulo de yaw, cujo método de cálculo será apresentado posteriormente.

2.2.2. Linha d'água (Plano de flutuação – Plano de Referência)

É mandatório que a linha d'água esteja definida em condições normais de trim e banda, conforme preconizado no manual de instrução do fabricante (Kongsberg Maritime AS, 2012). As coordenadas podem ser obtidas da marcação de calado, no mínimo em quatro pontos (alhetas e bochechas), porém recomenda-se o máximo de observações para melhor robustez do método matemático. É usual que os navios possuam pequenos cordões de solda (Figura 3) ao longo do constado para referenciar o local da linha de flutuação e facilitar a pintura da linha d'água. Esses cordões de solda poderão ser utilizados para as medições de interesse.



Figura 3 – Locais de medição da linha d'água (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Dado que as coordenadas medidas da linha d'água são:

$$L_k = (X_k, Y_k, Z_k) \quad (9)$$

O plano de referência do SCE será aquele que melhor se ajusta às coordenadas L_k . De forma análoga à reta, entende-se que é impossível ter mais de três pontos reais concorrentes no mesmo plano, por isso deve-se empregar o MMQ e obter o plano que melhor se ajusta aos pontos da linha d'água.

O plano no R^3 é definido pela equação abaixo:

$$\hat{z} = \frac{-a}{c} \hat{x} - \frac{b}{c} \hat{y} - \frac{d}{c} \quad (10)$$

$$\vec{n} = (a, b, c) \quad (11)$$

O vetor \vec{n} é o vetor diretor do plano e é perpendicular a este (Figura 4).

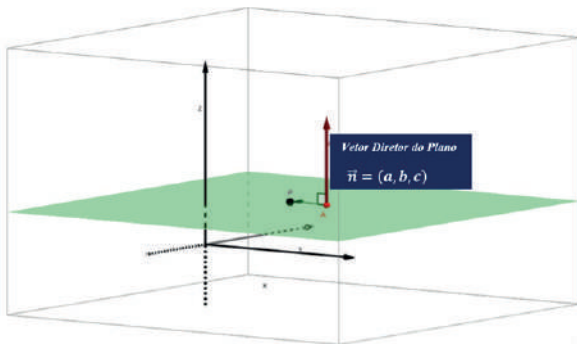


Figura 4 – Plano no R^3 (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Reescrevendo a equação do plano de forma geral e acrescido o afastamento do ponto em relação ao plano (e_n), teremos:

$$z_n = \frac{-a}{c} x_n - \frac{b}{c} y_n - \frac{d}{c} + e_n \quad (12)$$

Isolando e elevando ao quadrado teremos:

$$e_n^2 = \left(\frac{a}{c} x_n + \frac{b}{c} y_n + z_n + \frac{d}{c} \right)^2 \quad (13)$$

A partir dos afastamentos quadráticos (e_n^2), a determinação do vetor diretor do plano $\vec{n} = (a, b, c)$ é calculado pelo mesmo modelo matemático utilizado para a obtenção da linha de fé.

Transladando para o caso concreto, tem-se o vetor diretor do plano que melhor se ajusta à linha de flutuação da embarcação e deste vetor conheceremos os ângulos de *roll* e *pitch*, cujo método de cálculo será apresentado posteriormente.

2.2.3. Obtenção das coordenadas dos sensores

A equipe de campo deve determinar quais sensores serão levantados para apresentarem desvios lineares e angulares. Usualmente, os transdutores, os sensores inerciais (*IMU*) e as antenas que fornecem o *heading* da embarcação precisam ter seus ângulos de montagem definidos. Os demais sensores e locais de interesse demandam apenas informações lineares.

O método para extrair informações angulares é similar ao apresentado no estabelecimento do plano de referência e direção da linha de fé, uma vez que é necessário conhecer os ângulos de *yaw*, *pitch* e *roll* desses sensores.

As técnicas para obter as coordenadas de interesse podem diferir caso a caso, entretanto, especial atenção deve ser dada ao par de coordenadas que serão utilizados para cálculo do ângulo de *yaw*, pois uma falha de procedimentos poderá gerar erros grosseiros e comprometer o cálculo dos demais



desvios angulares. Quando se fala em medição de base da *IMU* ou transdutores, refere-se a equipamentos com dimensões reduzidas e que não proporcionam grandes linhas de base. Uma boa técnica é utilizar hastes rígidas para estender a linha de base, apoiada em pontos definidos nos sensores. Dessa forma, as inevitáveis incertezas das medições proporcionarão menos impacto para o cálculo dos ângulos de *pitch* e *roll* e na direção de *yaw*. A Figura 5 apresenta um exemplo de medição de par de coordenadas da base da *IMU*, com respectivo apoio nos pinos de fixação do sensor, o que garante o alinhamento boreste-bombordo, possibilitando ao cálculo de *yaw*. A Figura 6 exemplifica a medição desse alinhamento na face de transdutores.

Uma vez determinado um par de pontos criteriosamente escolhidos para represen-

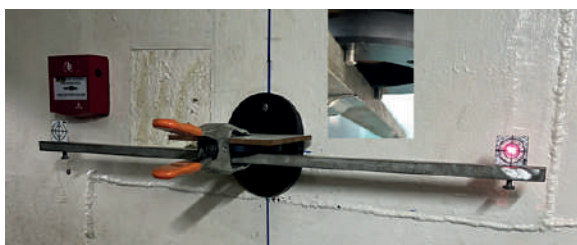


Figura 5 – Medição da orientação boreste-bombordo da base da *IMU*, com detalhe para o apoio fixo da régua metálica (Fonte: próprio autor)



Figura 6 – Exemplo de arranjo para medição de alinhamento de transdutor. (Fonte: OVERATH & SAND, 2017)

tarem a direção dos sensores (*yaw*), diversos outros pontos devem ser medidos para possibilitar a geração de um plano ajustado que representará os ângulos de *pitch* e *roll*. Esses demais pontos têm a obrigatoriedade apenas de serem medidos sob um instrumento que esteja fielmente paralelo ao sensor.

A localização do ponto central pode ser realizada por medição direta, ou média de observações. Cuidado especial deve ser tomado para que não haja alteração de cotas entre a face medida e o instrumento visado (adesivo refletor, prisma etc.). A equipe de campo deverá decidir qual método é mais adequado para cada situação.

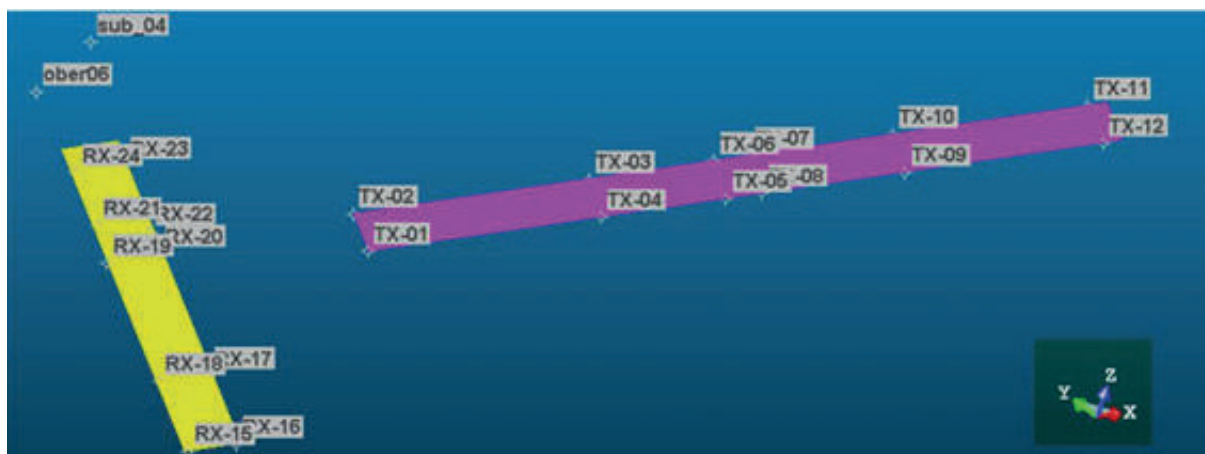


Figura 7 – Exemplo de medições de coordenadas ao longo de transdutores retangulares. (Fonte: OVERATH & SAND, 2015)

Caso o transdutor seja retangular, diversas medidas podem ser tomadas ao longo de seus lados, conforme mostrado na Figura 7. O ajustamento dessas coordenadas fornecerá o plano à face do transdutor (*roll* e *pitch*), bem como o alinhamento dos pontos de uma de suas arestas proverá a orientação (*yaw*).

2.2.4. Obtenção de ângulos com os vetores diretores

De posse dos vetores diretores, cujos procedimentos de cálculo são feitos por ajustamento de pontos da quilha ou linha d'água (itens 2.2.1 e 2.2.2), o ângulo é facilmente obtido por trigonometria simples.

Caso uma das referências seja o eixo de um plano cartesiano, o ângulo pode ser

calculado por relação trigonométrica direta entre os elementos do vetor diretor.

Dado um vetor diretor no plano cartesiano $\vec{v}=(a,b)$, o ângulo que esse vetor faz com o eixo das abscissas é:

$$\tan\theta = \frac{b}{a} \quad (14)$$

Em algumas situações, pode ser necessário calcular o ângulo entre dois vetores conhecidos. Nesses casos, o produto escalar (Figura 8) fornecerá o ângulo desejado (equação 15), porém sem referência ao sentido de rotação (positivo ou negativo). Uma análise qualitativa deve ser realizada para definir a orientação em questão.

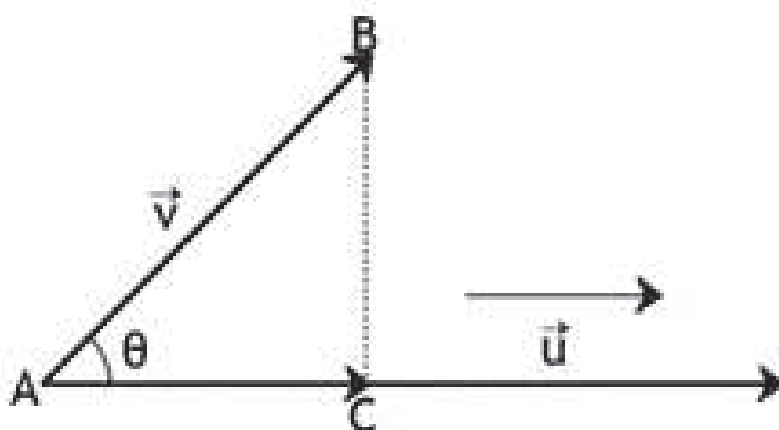


Figura 8 – Produto Escalar (Fonte: MACEDO, 2008)

$$\cos\theta = \frac{\vec{AB} \cdot \vec{AC}}{|\vec{AB}| * |\vec{AC}|} \quad (15)$$

2.2.5. Rotação e translação de sistemas de coordenadas

Nesta etapa, será abordada a revisão teórica para rotação e translação de

sistemas de coordenadas (SHOEMAKE, 1985).

A equação geral para transformação de sistema de coordenadas pode ser definida por:



$$P_{SCE} = Rot \cdot P_{SCL} \quad (16)$$

$$P_{SCE-O} = P_{SCE} - O_{SCE} \quad (17)$$

Onde P_{SCL} é a matriz coluna com as coordenadas do ponto no SCL. O ponto O_{SCE} é a origem arbitrada no SCE e P_{SCE-O} é o ponto rotacionado e transladado para uma origem arbitrada.

A matriz Rot é o produto da rotação nos três eixos, a saber:

- Rotação em X: movimento de *roll*, definida pela letra grega θ ;
- Rotação em Y: movimento de *pitch*, definida pela letra grega Φ ; e
- Rotação em Z: movimento de *yaw*, definida pela letra grega Ψ .

$$Rot_x(roll) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$Rot_y(pitch) = \begin{bmatrix} \sin(\Phi) & 0 & \cos(\Phi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos(\Phi) & 0 & -\sin(\Phi) \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$Rot_z(yaw) = \begin{bmatrix} \cos(\Psi) & -\sin(\Psi) & 0 \\ \sin(\Psi) & \cos(\Psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

As rotações devem obedecer à sequência de Tait-Bryant (KUSS, 2006), portanto:

$$Rot = Rot_x \cdot Rot_y \cdot Rot_z \quad (21)$$

$$Rot = \begin{bmatrix} \cos(\Phi) * \cos(\Psi) & -\cos(\Phi) * \sin(\Psi) & \sin(\Phi) \\ \cos(\theta) * \sin(\Psi) + \cos(\Psi) * \sin(\Phi) * \sin(\theta) & \cos(\theta) * \cos(\Psi) - \sin(\Phi) * \sin(\theta) * \sin(\Psi) & -\cos(\Phi) * \sin(\theta) \\ \sin(\theta) * \sin(\Psi) - \cos(\theta) * \cos(\Psi) * \sin(\Phi) & \cos(\Psi) * \sin(\theta) + \cos(\theta) * \sin(\Phi) * \sin(\Psi) & \cos(\Phi) * \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Na prática, serão realizadas sucessivas rotações para converter as coordenadas do SCL para o SCE, como será visto no fluxograma de trabalho.

2.3. Fluxograma de Trabalho

Os conhecimentos teóricos necessários apresentados até aqui são fundamentais, porém não suficientes para desenvolver o trabalho de campo e gabinete. É importante a organização das etapas e saber manipular os dados em cada passo dos trabalhos. Para auxiliar o hidrógrafo nessa atividade, propõe-se o fluxograma abaixo, que será discutido neste capítulo.

1. Reconhecimento do local, embarcação e estabelecimento prévio dos pontos a serem materializados e levantados.
2. Levantamento e processamento (ajustamento) das coordenadas de interesse.
3. Ajustamento dos pontos que materializam a quilha da embarcação.
4. Cálculo do ângulo de *yaw* da embarcação.
5. Rotação das coordenadas do plano de referência em *yaw*.
6. Ajustamento dos pontos que materializam o plano de referência (linha d'água).
7. Cálculo do ângulo de *pitch* da embarcação.

8. Rotação das coordenadas do plano de referência em *pitch* (e *yaw*).
9. Ajustamento dos pontos que materializam o plano de referência (linha d'água).
10. Cálculo do ângulo de *roll*.
11. Rotação das coordenadas do plano de referência em *roll*.
12. Rotação das coordenadas dos sensores e pontos de interesse.
13. Verificação das rotações.
14. Criação dos planos ajustados dos sensores de interesse.
15. Cálculo da posição do plano da *IMU* e dos transdutores.
16. Cálculo dos desvios angulares do plano da *IMU* e dos transdutores.
17. Cálculo dos desvios das antenas que fornecem a proa da embarcação (*heading*).
18. Relatório.

2.3.1. Reconhecimento, levantamento topográfico e ajustamento dos pontos que materializam a quilha da embarcação (etapas 1 até 4)

Cada embarcação terá seus desafios próprios. Na primeira oportunidade, o encarregado da faina deverá organizar a equipe, separar o material necessário e realizar a visita ao navio, dique e imediações. Alguns tópicos são mandatórios e devem ser definidos nesta etapa, como por exemplo:

- a) Materialização dos pontos das poligonais de apoio;
- b) Identificação dos pontos que materializarão o plano de referência e linha de fé da embarcação;

c) Identificação de todos os sensores, antenas, transdutores etc.;

d) Reconhecimento do caminhamento topográfico interno necessário para acesso ao compartimento onde está localizado o sensor de movimento (*IMU*); e

e) Materializar pontos de apoio para medições auxiliares (medição de calado, por exemplo).

O levantamento topográfico determinará todas as coordenadas de interesse em relação ao SCL (Figura 9). É fundamental que essa etapa seja especialmente criteriosa, objetivando a melhor acurácia possível e determinante para a qualidade final dos resultados alcançados. É obrigatório que cada coordenada esteja acompanhada de sua respectiva incerteza. Dentre todas as coordenadas obtidas, aqueles referentes à quilha da embarcação terão utilidade prática nesta etapa para o cálculo da direção da linha de fé em relação ao SCL. Deverá ser determinada a reta no plano horizontal que melhor se ajusta a essas coordenadas e esse lugar geométrico bidimensional passará a representar a linha de fé e sua direção em relação ao plano cartesiano do SCL. O método matemático a ser utilizado é o ajustamento por mínimos quadrados (MMQ), descrito no item 2.2.1.

2.3.1.1. Cálculo de *yaw* da embarcação:

O vetor diretor da linha de fé é obtido por MMQ das coordenadas da quilha e aponta na direção que a embarcação se encontra no SCL (item 2.2.1). Essa direção é o ângulo de *YAW* que a embarcação possui e pode ser calculado por



trigonometria direta, ou produto escalar (item 2.2.4) com os elementos do vetor em questão. A Figura 9 apresenta os vetores em questão: na cor verde, a linha de fé e, em encarnado, o eixo do SCL.

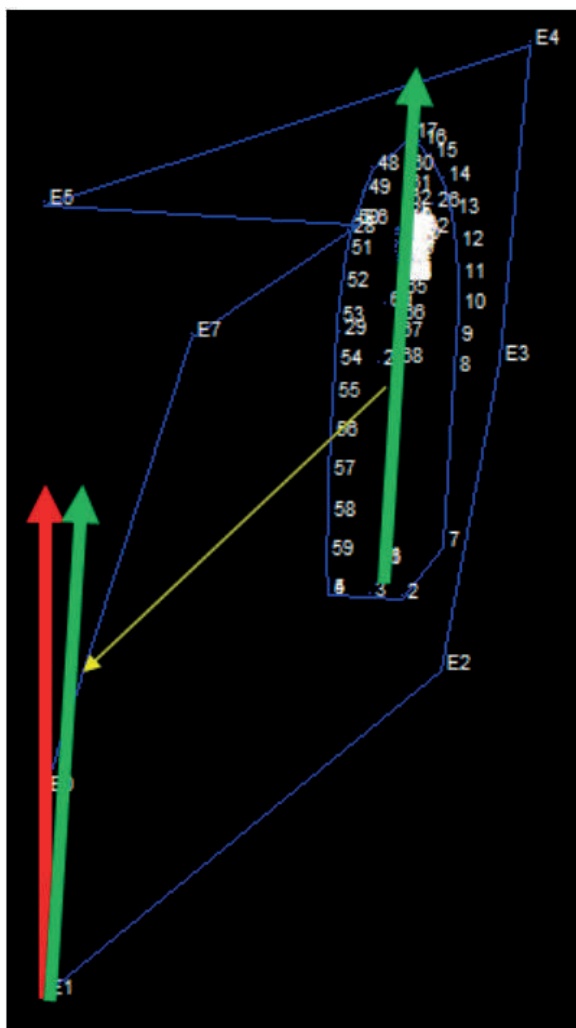


Figura 9 – Levantamento topográfico e representação do vetor linha de fé (verde) e orientação do SCL (vermelho). (Fonte: BAPTISTA, 2022)

Destaca-se que esse vetor é bidimensional no plano XY e especial atenção deve ser dada para o sinal desse ângulo. Caso o cálculo seja realizado de forma algébrica, o sinal será atribuído pelos cálculos trigonométricos, porém caso seja utilizado o método por produto escalar, o

valor sempre será positivo. No segundo caso, uma análise qualitativa deve ser realizada e o sinal do ângulo será atribuído manualmente (positivo para boreste). Esse valor é o ângulo de *yaw*, que será aplicado na próxima etapa do processamento.

2.3.2. Rotação das Coordenadas do plano de referência em *yaw*, estabelecimento do plano de referência e determinação dos ângulos de *pitch* e *roll* da embarcação (etapas 5 até 11).

O ângulo de *yaw* da embarcação, obtido através do vetor calculado no passo anterior, deve ser utilizado para rotacionar todas as coordenadas (item 2.2.5) do plano de referência, com sinal do ângulo de rotação oposto àquele previamente calculado. Opcionalmente, as coordenadas da quilha poderão ser igualmente rotacionadas para representação gráfica (Figura 10).

De posse das coordenadas da linha d'água, previamente rotacionadas em *yaw*, deve ser calculado um plano que melhor se ajusta a esses pontos, por meio do MMQ (item 2.2.2). Conforme supramencionado, o vetor calculado conterá valores de *banda* e *trim* da embarcação e pela convenção de Tait-Bryant (KUSS, 2006), o próximo ângulo a ser determinado deve ser *pitch*.

2.3.2.1. Cálculo de *pitch* da embarcação:

O vetor diretor do plano que melhor se ajusta às coordenadas da linha d'água é perpendicular a esse plano. O ângulo a ser calculado é o *pitch*, portanto

deve-se analisar os elementos desse vetor no plano XZ (Figura 11), ou seja:

$$\vec{n} = (abc) \quad (23)$$

$$PITCH = \tan^{-1}\left(\frac{a}{c}\right) \quad (24)$$

2.3.2.2. Cálculo de roll da embarcação:

O conjunto das coordenadas do plano de referência que foi previamente rotacionado de *yaw* deve ser rotacionado com o ângulo de *pitch* calculado no passo anterior. Essas coordenadas resultantes estão isentas dos ângulos já rotacionados (*yaw*

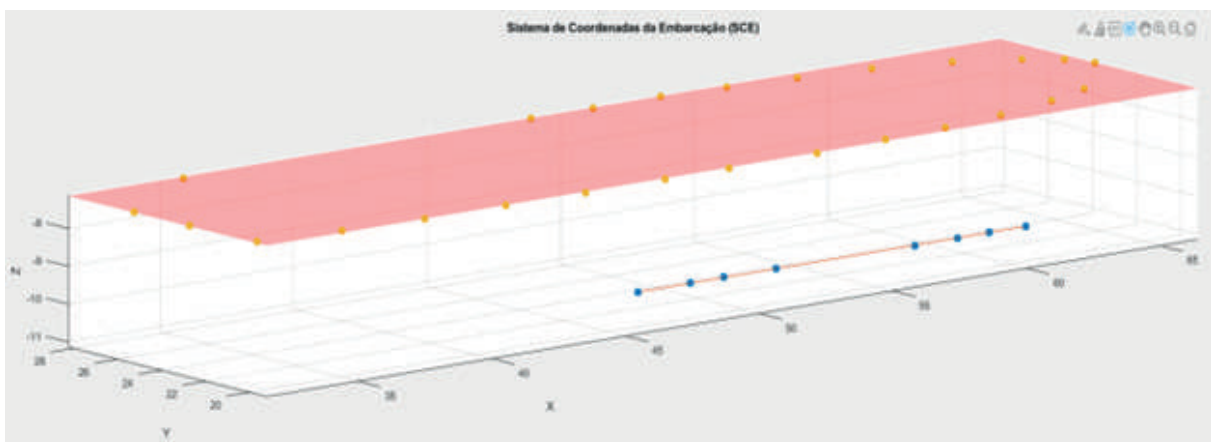


Figura 10 – Representação da quilha (pontos azuis) e plano de flutuação (pontos amarelos) rotacionados em *yaw*. (Fonte: BAPTISTA, 2022)

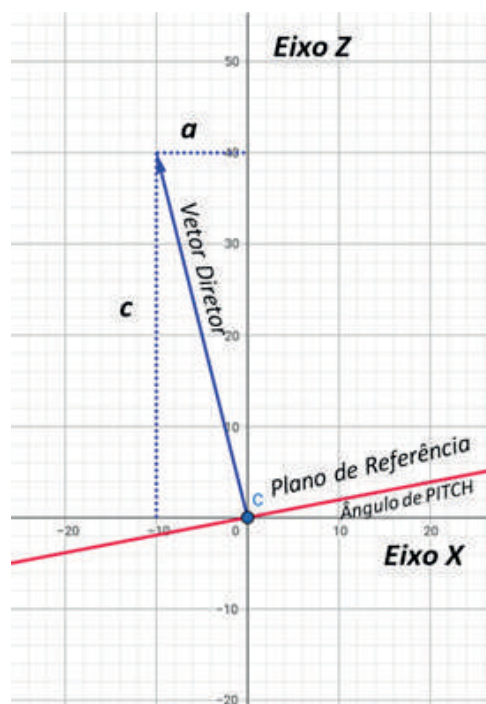


Figura 11 – Plano de referência (corte XZ) e vetor diretor. (Fonte: próprio autor)

e *pitch*), portanto, devem gerar um novo plano ajustado por MMQ, empregando os mesmos métodos anteriores. Finalmente, o valor de *roll* será calculado com base nos elementos do vetor diretor no plano YZ desse novo plano ajustado, ou seja:

$$ROLL = \tan^{-1}\left(\frac{-b}{c}\right) \quad (25)$$

Nesta etapa ficam definidos os ângulos que a embarcação possui no dique. Como uma forma de verificar se esses valores estão coerentes, uma rotação em *roll* pode ser aplicada ao conjunto de pontos previamente eliminados de *yaw* e *pitch*. Do resultado, gera-se um outro plano ajustado que deverá ter seu vetor diretor $\vec{v} = (0, 0, 1)$.



2.3.3. Rotação de coordenadas e determinação de posição e ângulos de montagem de sensores e relatório final (etapas 12 a 18).

Todas as coordenadas dos sensores devem ser rotacionadas dos ângulos de *yaw*, *pitch* e *roll* da embarcação. A origem do sistema de coordenadas pode ser deslocada para um local conveniente, sendo normalmente adotado o centro da base do sensor de atitude (item 2.2.5). Dado que todas essas coordenadas são solidárias ao navio, entende-se que agora estamos tratando das posições no Sistema de Coordenadas da Embarcação.

Os afastamentos lineares podem ser medidos diretamente por diferenças entre coordenadas. Os sensores que demandam conhecimento de seus ângulos de montagem devem ter suas coordenadas rotacionadas submetidas ao ajustamento por MMQ para planos e retas. Os vetores diretores resultantes devem ser analisados para extrair os ângulos de *yaw*, *pitch*, *roll* desses sensores, em relação ao SCE. Os procedimentos matemáticos para este fim já foram descritos neste artigo nos itens 2.3.1.1 (*yaw*), 2.3.2.1 (*pitch*) e 2.3.2.2 (*roll*).

O alinhamento do par de antenas que fornecerá o *heading* da embarcação deve ser calculado conforme o procedimento do cálculo de *yaw*, sendo dispensado o ajustamento, pois o vetor que expressa a direção do alinhamento dessas antenas será a diferença entre suas coordenadas, no plano XY. O valor numérico do desvio em *yaw* do par de antenas em relação à linha de fé pode ser calculado

por trigonometria direta ou produto escalar (item 2.2.4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A metodologia apresentada resulta em distâncias lineares em relação ao ponto de origem arbitrado e afastamentos angulares em *roll*, *pitch* e *yaw*, em relação ao plano de referência adotado. No caso deste artigo, assim como recomendado em manual do fabricante de sistemas multifeixe, o plano de flutuação da embarcação foi escolhido como referência.

Na seção de metodologia deste artigo, foi possível verificar que é necessário coletar uma quantidade mínima de coordenadas para que o método seja viável, principalmente nas etapas diretamente ligadas ao ajustamento de planos e retas.

Para calcular o *yaw*, são necessárias apenas duas coordenadas que expressam a linha de fé da embarcação ou a orientação em *yaw* de sensores. Para os ângulos de *roll* e *pitch*, busca-se um mínimo de quatro registros de pontos que expressam o plano de referência da embarcação (linha d'água) ou o plano de sensores (face do transdutor ou base da IMU), a fim de possibilitar o ajustamento de planos por MMQ.

As coordenadas são obtidas em estruturas físicas da embarcação que podem ter sofrido deformações ao longo do tempo, ou as referências empregadas podem ter desvios oriundos de seus estabelecimentos, como por exemplo os cordões de solda que perenizam a linha d'água. No caso dos sensores, há dificuldades inerentes às dimensões reduzidas dos equipamentos ou falta de visadas adequadas com instrumentos

óticos. O hidrógrafo dificilmente saberá qual a quantidade desejável de coordenadas a serem obtidas para que possíveis desvios sejam minimizados estatisticamente. Até que um estudo direcionado ao tema seja desenvolvido, recomenda-se que sejam adquiridas, pelo menos, oito coordenadas para a definição do plano de referência do SCE, quatro para o plano de sensores e três para extrair direções (*yaw*). Essas coordenadas serão utilizadas para estabelecimento de planos e linhas ajustadas.

Uma forma empírica para expressar a qualidade das coordenadas obtidas topograficamente pode ser facilmente implementada logo após os ajustamentos. O cálculo de resíduos entre planos e retas ajustados aos respectivos pontos que originaram essas referências fornecerá uma estimativa da qualidade das medições (equações 5 e 13). Espera-se que os resíduos sejam da ordem de poucos milímetros, em consonância com a acurácia dos instrumentos e metodologias topográficas utilizados em campo.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi apresentado um método alternativo para medição de *offsets* que pode ser

aplicado em qualquer tipo de embarcação, seja uma pequena lancha hidrográfica, até navios de grande porte. O método é condizente com instruções constante nos manuais dos fabricantes de sistemas multi-feixe e assemelhado aos procedimentos adotados por empresas reconhecidas que realizaram trabalhos similares em navios da DHN.

A base para o controle dimensional é um trabalho topográfico sólido e realizado com as melhores práticas de campo. O emprego de equipamentos de qualidade, em especial estação total com elevada acurácia, proporcionará resultados adequados.

Os *offsets* calculados devem ser lançados em *softwares* de aquisição ou processamento de dados hidrográficos e contribuirão para qualidade das informações batimétricas.

Dado que é possível calcular incertezas de todas as coordenadas e as relações matemáticas são conhecidas, torna-se possível realizar a propagação de incertezas para distâncias e ângulos. Recomenda-se para trabalhos futuros discutir a propagação de variâncias para cada coordenada e aplicar técnicas de teoria dos erros para extrair incertezas angulares de retas e planos ajustados por MMQ.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, B. N. Relatório de Medição de *Offset* no AvPqHoAspMoura. Niterói, 2022.

INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION (IHO). *Publication C-13. Manual on Hydrography*. Mônaco, 2005. Disponível em: <https://www.iho.int/iho_pubs/IHO_Download.htm>. Acesso em: 13 fev. 2023.



KONGSBERG MARITIME AS. EM2040 Instruction Manual. Multibeam Beam Hydrographic Echo Sounder. Horten - Norway, 2012.

KUSS, P. Rotation Sequence. Disponível em: <http://www.omg.unb.ca/people/pimk/software/html/rotation_seq.html>. Acesso em: 4 abr. 2023.

MACEDO, M. A. Geometria analítica vetorial. Fortaleza: UAB/IFCE, 2008

MIKHAIL, E.; GRACIE, G. Analysis and Adjustment of Survey Measurements. VNR, Nova Iorque, 1981.

OVERATH & SAND. Moderne Methoden zur Einmessung von Vermessungsschiffen. Kloben, 2017.

OVERATH & SAND. Relatório *Offset* NPHoVitaldeOliveira. Singapura, 2015.

PARKER. Relatório de *Offset* do NHoAmorimdoValle. Niterói, 2014.

SHOEMAKE, K. Animating Rotation with Quaternion Curves Proc. SIGGRAPH 1985, pag. 245 - 254.





MIGRAÇÃO DE ONDAS DE AREIA NAS PROXIMIDADES DE MARTHA'S VINEYARD, MASSACHUSETTS, EUA.¹

Vinicius Santos Pessanha ¹

RESUMO

Foi observada a migração de ondas de areia (*sand waves*) de aproximadamente 2 m de altura por quase 40 m com rotação anti-horária entre duas sondagens batimétricas realizadas no intervalo de três meses nas proximidades de Martha's Vineyard, Massachusetts. A região é caracterizada por fortes correntes de maré, eventos intermitentes de ondas superficiais e baixa profundidade local variando de 2 a 7 m. Este estudo emprega o modelo Delft3D com uma abordagem tridimensional (3D) para examinar a dinâmica das ondas de areia, incorporando ondas superficiais, ventos, correntes e observações batimétricas. O modelo simula com sucesso a migração das ondas de areia em comparação com as observações. Análises de sensibilidade do modelo mostram que a migração das ondas de areia reduz em 65% com a ausência das ondas superficiais. A velocidade de migração das ondas de areia modelada é correlacionada com o parâmetro de *Shields* para as correntes, o que permitiu

¹ Oficial do Corpo da Armada, Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física e Ph.D em Oceanografia Física pela Naval Postgraduate School – NPS. Encarregado da Seção de Modelagem Oceanográfica do Centro de Hidrografia da Marinha – CHM. Este artigo é uma tradução de parte do original em inglês publicado na revista International Journal of Sediment Research (Pessanha *et al.*, 2023) e que integra a tese de doutorado do autor.



observar que aumentos acentuados na velocidade de migração ocorrem quando o parâmetro de *Shields* para as ondas aumenta em resposta a eventos energéticos de ondas superficiais. O efeito combinado das marés, ondas superficiais e batimetria é a origem da rotação das ondas de areia, o que foi identificado a partir do uso do parâmetro de *Shields* como indicador da influência das correntes e das ondas superficiais na dinâmica das ondas de areia.

Palavras-chave: Migração de ondas de areia, Modelagem morfológica, Delft3D, Fundo marinho de areia, Martha's Vineyard

ABSTRACT

Sand waves of approximately 2 m in height were observed to migrate nearly 40 m with counterclockwise rotation between two bathymetric surveys performed three months apart near the southeastern corner of Martha's Vineyard, Massachusetts. The region is characterized by strong tidal currents, intermittent energetic surface wave events, and shallow water with local depth ranging from 2 to 7 m. This study uses the process-based model, Delft3D, with a three-dimensional approach to examine the sand wave dynamics by incorporating surface waves, winds, currents, and bathymetric observations. The model successfully simulates sand wave migration in comparisons to observations. Model sensitivity analyses show that the sand wave migration reduces by 65% with the absence of the surface waves. The modeled sand wave migration speed is correlated with the tidal current

Shields parameter, and sharp increases in migration speed occur when the wave-driven Shields parameter increases in response to energetic surface wave events. The combined effect of tides, surface waves, and bathymetry is the origin of the rotational aspect of the sand wave, using the Shields parameter as an indicator of tidal currents and surface wave influence on sand wave dynamics.

Keywords: Sand wave migration, Numerical morphological modeling, Delft3D, Sandy seafloor, Martha's Vineyard

1. INTRODUÇÃO

Em águas rasas, formas de fundo criadas por correntes de maré ou ondas de superfície são comumente observadas no fundo marinho arenoso. A escala espacial dessas formas de fundo varia de *ripples* com comprimentos de onda e alturas característicos de alguns centímetros até bancos de areia com comprimentos de onda de vários quilômetros e alturas até 30 m (WANG *et al.*, 2019). As ondas de areia são formas de fundo em uma escala espacial intermediária, com comprimentos de onda de centenas de metros, velocidades de migração na ordem das dezenas de metros por ano e altura de ondas de vários metros (GIOVANNI BESIO *et al.*, 2004). Estas feições normalmente são encontradas em regiões com correntes de maré maiores que 0,5 m/s, como o Mar do Norte (DAMEN *et al.*, 2018; KRABBENDAM *et al.*, 2021), Estreito de Taiwan (BOGGS, 1974), costa da Argentina (ALIOTTA & PERILLO, 1987), costa

dos Estados Unidos (BARNARD *et al.*, 2006; JONES & TRAYKOVSKI, 2019; XU *et al.*, 2008), Mar da China (LI *et al.*, 2011) e Mar de Barents (BELLEC *et al.*, 2019). Além disso, a migração das ondas de areia pode afetar atividades humanas, reduzindo a profundidade de canais de navegação, expondo cabos submarinos, interagindo com linhas de gás e estações de energia eólica e causando enterramento/migração de munição no fundo do mar (BESIO *et al.*, 2008; CHU *et al.*, 2021, 2022). Portanto, o estudo das características das ondas de areia é essencial e tradicionalmente realizado analisando os dados históricos, o que pode ser melhorado pelo emprego de modelos morfodinâmicos (TONNON *et al.*, 2007).

Hulscher (1996) apresentou um modelo linear para explicar a formação de ondas de areia, no qual a interação da corrente de maré com o fundo marinho gera instabilidades morfológicas e faz com que as ondas de areia se desenvolvam. De acordo com este modelo, a oscilação da corrente de maré sobre as perturbações do fundo do mar gera células de recirculação no plano vertical, induzindo o transporte de sedimentos com fluxo divergindo nas depressões e convergindo nas cristas. O efeito gravitacional induz o transporte de sedimentos em direção às depressões, equilibrando o crescimento das ondas de areia. Németh *et al.* (2002) e Besio *et al.* (2004) adicionaram uma corrente residual à corrente de maré oscilatória apresentada no modelo de Hulscher (1996). Seus resultados mostram que a migração das ondas de areia é gerada pela assimetria do fluxo em regiões onde a maré vazante

é mais forte que a maré enchente ou vice-versa. Leenders *et al.* (2021) forneceu uma visão geral detalhada de vários processos físicos e contribuições adicionadas ao modelo proposto por Hulscher (1996). No entanto, os modelos lineares são aplicáveis apenas para as primeiras etapas do desenvolvimento das ondas de areia. Portanto, são exigidos modelos que incluam efeitos não lineares para investigar o comportamento das ondas de areia a longo prazo. Modelos, como o apresentado por Blondeaux & Vittori (2016), que incluem um modelo baseado em processos (*process-based*) e uma abordagem empírica, produzem bons resultados, mesmo que a completa evolução das ondas de areia ao longo do tempo não possa ser resolvida devido à falta de acoplamento entre a hidrodinâmica e a morfodinâmica (KRA-BBENDAM *et al.*, 2021). Campmans *et al.* (2018) propôs um modelo não linear para estudar os efeitos dos ventos e das ondas de superfície no desenvolvimento de ondas de areia, assumindo ondas monocromáticas, uma viscosidade (*eddy viscosity*) vertical constante e desconsiderando o transporte de sedimento junto ao fundo (*bed load sediment transport*) e as interações onda-corrente. Eles concluíram que os ventos e ondas de superfície diminuem a altura das ondas de areia e aumentam a migração durante as tempestades. Além disso, modelos numéricos baseados em processos foram desenvolvidos para estudar as características das ondas de areia, os processos que as impactam e sua dinâmica a longo prazo (por exemplo, VAN DEN BERG *et al.*, 2012; NÉMETH *et al.*, 2007). No entanto, esses estudos foram



limitados por parâmetros altamente idealizados, como batimetria inicial senoidal e simplificações para as forçantes de maré, equações para estimar o transporte de sedimentos e turbulência.

Os avanços na modelagem numérica permitiram um melhor entendimento das interações entre a dinâmica das ondas de areia e a turbulência próxima ao leito (LIU *et al.*, 2019; KHOSRONEJAD *et al.*, 2020). A maré e as ondas afetam a migração de ondas de areia somente se influenciarem a turbulência junto ao fundo marinho. Assim, é necessário o uso de modelos de alta fidelidade capazes de representar esses processos.

O modelo morfodinâmico Delft3D (LESSER *et al.*, 2004) é um modelo de alta fidelidade, capaz de prever a migração de ondas de areia. Borsje *et al.* (2013) e Borsje *et al.* (2014) examinaram o papel da formulação de turbulência e do transporte de sedimentos em suspensão (*suspended sediment transport*), representando satisfatoriamente a etapa inicial de formação das ondas de areia em comparação com observações de campo. Além disso, van Gerwen *et al.* (2018) consideraram os efeitos do transporte de sedimentos em suspensão e da assimetria da maré, indicando que ambos causam redução nas alturas das ondas de areia. Wang *et al.* (2019) mostraram que a inclinação do fundo marinho é essencial para modelar o comprimento de onda e a migração de ondas de areia, analisando ondas de areia sob várias combinações de forçante de marés e sedimentos. Ademais, Damveld *et al.* (2020) estudaram padrões de sedimentos de diferentes tamanhos em ondas

de areia, mostrando a influência da assimetria da maré na distribuição de sedimentos. Krabbendam *et al.* (2021) usaram um modelo Delft3D para prever com êxito as ondas de areia observadas usando batimetria realista. Por sua vez, Leenders *et al.* (2021) investigaram a migração de ondas de areia em direção à parte superior de um banco de areia, sob os efeitos da maré modificada pela topografia do banco de areia. O uso de modelos morfodinâmicos avançados permite o estudo de ondas de areia em um cenário mais realista, reduzindo o número de simplificações que limitam o desempenho dos modelos anteriores.

Recentemente, Jones & Traykovski (2019) reportaram a migração de ondas de areia observadas durante um experimento de campo perto da ponta sudeste de Martha's Vineyard, Massachusetts. Levantamentos batimétricos e dados do sonar rotativo instalado no local mostraram a migração de ondas de areia com velocidade média de 50 cm/dia, enquanto giravam no sentido anti-horário. Além disso, eles apresentaram um modelo conceitual para prever a velocidade de migração de ondas de areia e descrever a dinâmica da interação de *megaripples* menores (ondulações de areia com menos de 1 m de altura) com ondas de areia maiores. O modelo se saiu bem em fluxos dominados pela maré. No entanto, está limitado a períodos de energia de onda mínima, pois o modelo negligencia o efeito das ondas de superfície.

Os estudos anteriores foram principalmente limitados pelo uso de batimetria simplificada, de modelos com grades 2DV (bidimensional vertical) e parâmetros idealizados. Além disso, há escassez de estu-

dos em regiões com profundidades rasas, em particular sobre os processos físicos que afetam as ondas de areia de migração rápida. Portanto, este artigo complementa o trabalho anterior (JONES & TRAYKOVSKI, 2019) implementando um modelo Delft3D (com abordagem 3D) para reproduzir a morfodinâmica local, considerando a batimetria, maré, ventos e ondas de superfície observadas durante o experimento. Além disso, usando observações e os resultados da modelagem, este artigo investiga os processos físicos que causam a alta velocidade de migração e o aspecto rotacional das ondas de areia.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo e experimento de campo

A área de estudo está localizada em Wasque Shoals, a cerca de 1 km da ponta sudeste de Martha's Vineyard. Esta

região se caracteriza pelas fortes correntes de maré e intermitentes eventos de ondas associadas a tempestades. As correntes de maré dessa região são dominadas pelas componentes semidiurnas M2 e N2, responsáveis por cerca de 80% e 10% da variância, respectivamente (HOPKINS *et al.*, 2017). A direção das ondas de superfície observada durante o experimento de campo é predominantemente de sul e sudeste. Wasque Shoals é caracterizada por um fundo de areia e correntes excedendo 1 m/s com direção predominantemente leste-nordeste e oeste durante a enchente e vazante, respectivamente. De acordo com Hopkins *et al.* (2017), durante a vazante a corrente se separa da linha de costa próxima ao canto sudeste de Martha's Vineyard, o que reduz o fluxo da maré vazante na área de interesse e cria um padrão assimétrico de fluxo com a maré de enchente dominante. A batimetria complexa, com profundidade variando de 2 a 7 m, inclui feições como *megaripples* e ondas de areia. A altura das

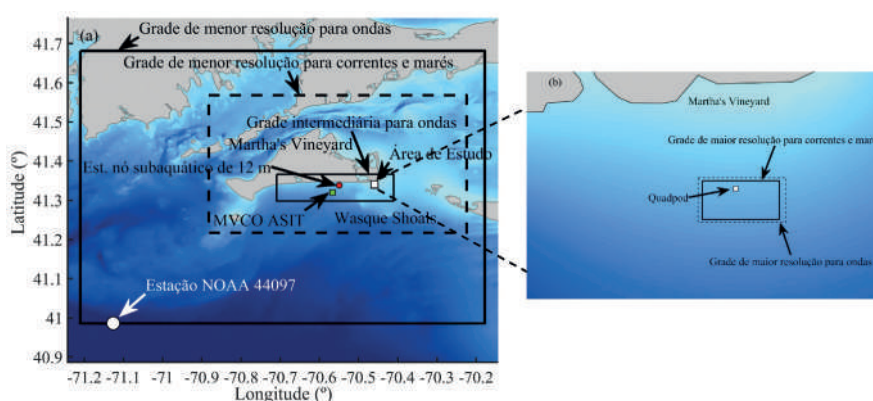


Figura 1 – Área de estudo e limites das grades do modelo. (a) Limites da grade de menor resolução para ondas (linhas sólidas grossas), da grade de menor resolução para correntes e marés (linhas tracejadas), e da grade intermediária para ondas (linhas sólidas finas) com a estação NOAA 44097 representada pelo ponto branco na borda sul da grade de menor resolução para ondas (40.967° N, 71.126° W). O ponto vermelho indica a localização da estação de observações do nó subaquático de 12 m da MVCO (41.3366° N, 70.5564° W), o quadrado verde representa o ASIT da MVCO em 41.325° N, 70.567° W e o marcador branco, a área de estudo. (b) Área de estudo ampliada contendo os limites da grade de maior resolução para ondas (linhas tracejadas) e da grade de maior resolução para correntes e marés (linhas sólidas finas). O quadrado branco em 41.3404° N, 70.459° W representa a localização do *quadpod* (estação de observação). Adaptado de Pessanha et al. (2023)



ondas de areia na região varia de 2 a 4 m (TRAYKOVSKI & AUSTIN, 2017).

Durante o experimento, foi observada a migração de ondas de areia ao mesmo tempo que ondas de superfície e correntes. Uma estrutura metálica, chamada *quadpod*, foi lançada em 20 de novembro de 2013 (o quadrado branco na Fig. 1b mostra sua localização) em uma profundidade de aproximadamente 6,5 m (Fig. 2). Um sensor Aquadopp Nortek foi instalado no *quadpod* com 0,2 m de *bin* vertical para medir a velocidade do fluxo em uma faixa de 2 m, que foram usados para calcular a velocidade média da corrente a cada hora. Além disso, a altura significativa, a direção média e o período de pico das ondas foram estimados a partir de sensores de pressão dos velocímetros acústicos Doppler, *acoustic Doppler velocimeters* (ADV), fixados ao *quadpod*. Traykovski & Austin (2017) e Jones & Traykovski

(2019) apresentam informações detalhadas sobre a instrumentação.

Além disso, dois levantamentos batimétricos foram realizados no início (16 de outubro de 2013) e no final (10 de janeiro de 2014) do experimento. A batimetria foi sonhada utilizando uma embarcação autônoma de pequeno porte com propulsão a jato, *Jetyak* (KIMBALL *et al.*, 2015), equipado com um ecobatímetro monofeixe de 200 kHz e um sistema de GPS *Post-Processed Kinetic* (PPK). Os levantamentos cobriram uma área de 400 m x 800 m com o espaçamento entre linhas de 30 m. As batimetrias inicial e final (Fig. 2) mostram a migração de uma onda de areia em forma de Y, sobre o *quadpod* localizado na depressão e representado pelo ponto branco. A onda de areia migrou para o nordeste, enterrando o *quadpod* na mesma data da batimetria final (JONES & TRAYKOVSKI, 2019). Além disso, os levantamentos batimétricos mostram que a onda de areia tem uma velocidade de migração

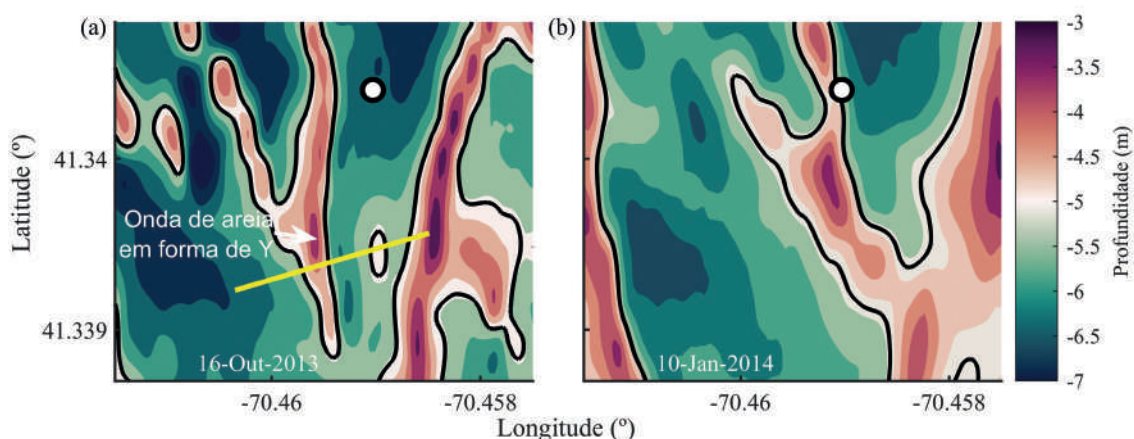


Figura 2 – Batimetria na área de estudo. Dados batimétricos do levantamento realizado em (a) 16 de outubro de 2013 e (b) 10 de janeiro de 2014. O ponto branco demarca a posição do *quadpod* e a curva preta representa a profundidade de 5 m. A linha amarela ilustra a seção usada para calibrar o modelo (160 m de comprimento). Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

maior na porção sul do que na porção norte e indicam uma rotação anti-horária.

2.2. Abordagem e configuração do modelo

O modelo de código aberto Delft3D, baseado em aproximação de águas rasas e capaz de examinar o impacto das ondas, correntes e transporte de sedimentos na evolução morfológica, foi implementado na área de Wasque Shoals. O modelo aplica um método numérico que se baseia em diferenças finitas usando uma grade estruturada e ortogonal para resolver as equações diferenciais parciais (LESSER *et al.*, 2004). O modelo Delft3D tem três módulos: correntes e marés (*flow*), ondas (*waves*) e morfologia (*morphology*). O módulo de correntes e marés prevê a altura da superfície do mar e as correntes, fornece estas informações para os módulos de ondas e morfologia como entrada (*input*), calcula o transporte de sedimentos e atualiza a batimetria sob a forçante de ventos e as marés. Considerando a altura da superfície do mar, batimetria, vento e correntes, o módulo de ondas prevê geração de ondas, propagação, dissipação e interações não lineares de onda-onda. Finalmente, o módulo de morfologia trabalha em ciclo com os módulos de onda e correntes e marés para atualizar a batimetria enquanto leva em consideração o transporte de sedimentos. A hidrodinâmica local também é influenciada por ondas e mudanças morfológicas, uma vez que os módulos estão conectados online. Além disso, Lesser *et al.* (2004) e o manual do usuário do Delft3D (DELTARES, 2022) fornecem mais informações sobre a descrição e as formulações do modelo.

O modelo compreende dois domínios acoplados usando o método de modelagem de aninhamento *offline* para melhorar a resolução espacial na área de interesse (Fig. 1). Nesse método, o domínio geral (menor resolução) fornece as condições de contorno para o domínio aninhado (maior resolução). Uma vez que as condições de contorno tenham sido criadas, as simulações usando o domínio aninhado podem ser executadas independentemente do domínio geral, reduzindo o custo computacional.

O domínio geral utiliza grades bidimensionais horizontais (2DH) com uma camada vertical (*depth-averaged mode*). A grade de menor resolução para correntes e marés (Fig. 1a), com uma resolução variando de 1 km a 40 m (na área de estudo), estende-se 40 km para norte e sul e 55 km para leste e oeste. A grade de menor resolução para ondas (86 km na direção norte-sul e 80 km na direção leste-oeste) tem uma resolução de 1 km, a resolução da grade intermediária de ondas é de 200 m e a resolução da grade de menor resolução para ondas é de 40 m. Semelhante a Roelvink & Walstra (2005), as grades de modelo de onda cobrem uma área maior do que as grades de correntes e marés, impedindo que as perturbações de fronteira do modelo de onda entrem no domínio de correntes e marés. Além disso, as condições de contorno do domínio geral foram definidas nas fronteiras externas da grade de menor resolução para correntes e marés e aplicando as variações de marés calculadas usando a solução inversa global de dados de altimetria (EGBERT & EROFEEVA, 2002) com os 13 principais constituintes astronômicos, incluindo M2,



S2, N2, K2, O1 e K1. A altura significativa, o período, as direções e o espalhamento direcional (*directional spreading*) das ondas foram usados para criar condições de contorno com base em observações da boia da NOAA 44097, localizada na isobatimétrica de 50 m (Fig. 1a). Além disso, os dados batimétricos do *U.S. Coastal Relief Model* (NOAA / NGDC, 1999), com resolução de 90 m, foram usados no domínio geral que não foi coberto pelo levantamento batimétrico realizado durante o experimento de campo. O passo de tempo foi escolhido em 9 segundos com base no número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). Os valores padrão do modelo Delft3D foram aplicados para a rugosidade do fundo de Chézy ($65 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$) e a viscosidade horizontal ($1 \text{ m}^2/\text{s}$). Além disso, o tempo de acoplamento dos módulos de correntes e marés e ondas foi ajustado para 60 minutos. O componente de atrito de fundo para a dissipação de onda foi calculado usando o modelo JONSWAP (HASSELMANN, 1974). Além disso, a quebra de ondas induzida pela profundidade (*depth-induced breaking*) (BATTJES & JANSSEN, 1978) foi ajustado para α igual a 1 e γ igual a 0,73 (valores padrão).

Fang & Wang (2000) e Fang & Rodi (2003) apresentaram um modelo tridimensional (3D) que considera o transporte de sedimento em suspensão e é capaz de prever a evolução de ondulações de areia no fundo. Seguindo uma abordagem similar, o domínio aninhado emprega uma grade 3D para examinar a dinâmica das ondas de areia, que é afetada por processos tridimensionais. A grade de menor resolução para correntes e marés (Fig. 1b)

cobre a área de estudo com uma resolução horizontal de 8 m e 20 camadas verticais (sigma não equidistante), com resolução em termos da porcentagem da profundidade local. As primeiras 5 camadas (mais próximas ao fundo) têm a maior resolução, 2% da profundidade. As 12 camadas seguintes têm uma resolução de 5% e as 3 últimas camadas (mais próximas da superfície) têm uma resolução de 10% da profundidade. O modelo utiliza as condições de contorno de Riemann nos 4 limites abertos no domínio aninhado, permitindo que as ondas passem a fronteira aberta sem serem refletidas de volta para o domínio computacional (VERBOOM & SLOB, 1984). O transporte de sedimentos, incluindo transporte de sedimento junto ao fundo e em suspensão, e a evolução morfológica foram calculados apenas no domínio aninhado permitindo a comparação com as observações de campo. Os valores padrão do modelo Delft3D foram aplicados para a camada inicial de sedimentos (5 m), altura inicial da superfície do mar (zero m) e um intervalo de *spin-up* (720 minutos) para evitar qualquer impacto de uma instabilidade hidrodinâmica inicial no cálculo da mudança de fundo. A viscosidade foi calculada usando o modelo de turbulência $k-\epsilon$. Além disso, os dados do levantamento batimétrico realizado em 10 de outubro de 2013 foram definidos como batimetria inicial. Com base no número CFL, um passo de tempo de 6 segundos foi estabelecido. A areia foi definida como tipo de sedimento, com um tamanho médio de grão (D_{50}) de $500 \mu\text{m}$ (HOPKINS *et al.*, 2018) e uma densidade específica de sedimento de $2.650 \text{ kg}/\text{m}^3$. Os arquivos de

entrada de vento foram configurados usando observações da *Air-Sea Interaction Tower* (ASIT), Martha's Vineyard Coastal Observatory (MVCO: <https://mvco.whoi.edu>), localizado a 3 km ao sul de Martha's Vineyard na isobatimétrica de 17 m de profundidade (Fig. 1b).

2.3. Simulação e avaliação de desempenho do modelo

A simulação foi projetada para prever a dinâmica da onda de areia observada durante o experimento de campo, que apresenta alta velocidade de migração e rotação no sentido anti-horário. Primeiro, o modelo foi calibrado e validado. Em seguida, os fatores que influenciam a morfodinâmica local foram analisados a partir de simulações considerando a inclusão e a ausência de ondas de superfície e vento. O desempenho do modelo simulando a hidrodinâmica local é avaliado comparando variáveis de saída do modelo com observações por meio do erro quadrático médio, *root mean square error* (RMSE), onde X é a variável de interesse (por exemplo, a altura significativa da onda), X_{mod} é o resultado do modelo, X_{obs} é a observação, N é o número de observações e $\langle X \rangle$ é a média temporal.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (1)$$

Além disso, o desempenho do modelo também é avaliado usando o *skill score* (SS) definido por

$$SS = 1 - \frac{(\sum |X_{mod} - X_{obs}|^2)}{[\sum (|X_{mod} - \langle X_{obs} \rangle| + |X_{obs} - \langle X_{obs} \rangle|)^2]} \quad (2)$$

para representar a capacidade de previsão do modelo (WILLMOTT, 1981) com $SS = 1$ para o resultado do modelo em total concordância com as observações; e $SS = 0$, por outro lado, para desacordo total. O

$$BSS = 1 - \frac{\langle (|z_{b,c} - z_{b,m}| - \Delta z_{b,m})^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (3)$$

Brier skill score (BSS) foi usado para avaliar a capacidade do modelo de representar as mudanças morfológicas, conforme estabelecido por van Rijn *et al.* (2003) onde $z_{b,c}$ é a batimetria modelada, $z_{b,m}$ é a batimetria observada, $z_{b,0}$ denota a batimetria inicial e $\Delta z_{b,m}$ é a incerteza da batimetria observada, aqui assumida como 0,05 m. A qualificação do desempenho do modelo sugerida por van Rijn *et al.* (2003) é considerada excelente quando o BSS entre 1 e 0,8, boa entre 0,8 e 0,6, razoável entre 0,6 e 0,3, pobre entre 0,3 e 0 e ruim quando menor que 0.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração do modelo

Os resultados do modelo usando a configuração descrita no item 2.2 foram comparados com dados da estação de observações do nó subaquático MVCO de 12 m por um período de um mês. A Fig. 3 indica um bom acordo entre os resultados do modelo e dados para a altura da superfície do mar (MWL), a altura significativa das ondas (H_s) e a velocidade média da corrente (V), com valores positivos de V representando o fluxo se movendo na direção da maré de



enchente e valores negativos o fluxo se movendo na direção da maré de va-

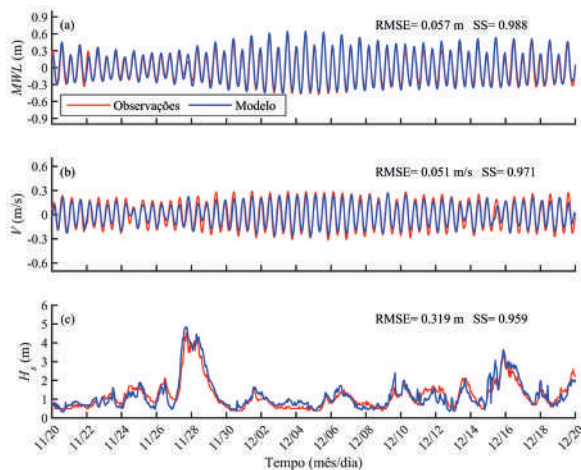


Figura 3 – Calibração do modelo para hidrodinâmica. Comparação entre os resultados do modelo (azul) e as observações coletadas no nó subaquático de 12 m do MVCO (vermelho) para (a) altura da superfície do mar (MWL), (b) velocidade média da corrente (V) com valores positivos indicando que a corrente se move na direção da maré de enchente e valores negativos indicando que a corrente se move na direção da maré de vazante e (c) altura significativa da onda (H_s). O *root mean square error* (RMSE) e o *skill score* (SS) para cada comparação são apresentados no canto superior direito dos painéis. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

zante. Uma vez que o modelo produziu resultados satisfatórios para MWL ($SS = 0,988$), V ($SS = 0,971$) e H_s ($SS = 0,959$), a calibração foi realizada com relação à morfologia.

A calibração foi realizada ajustando o parâmetro de declividade do fundo definido pelo usuário, *bed slope parameter* (α_{BS}), para ajustar o fator de correção para os efeitos da declividade do fundo, *correction factor for the bed slope effects* (α_s). Este parâmetro leva em conta o efeito da declividade do fundo no transporte de sedimento junto ao fundo e deve ser calibrado para prever adequadamente a migração das ondas de areia (WANG *et al.*, 2019). Valores mais elevados de α_{BS} produzem um efeito

de declividade do fundo mais forte, diminuindo o transporte de sedimento para a crista e aumentando o transporte de sedimento para a depressão da onda de areia. O resultado do modelo foi comparado com a batimetria observada ao longo da seção de calibração (160 m de comprimento) mostrado na Fig. 2, que está orientado na direção do fluxo médio. O parâmetro $\alpha_{BS} = 0,2$ obteve o melhor resultado com $BSS =$

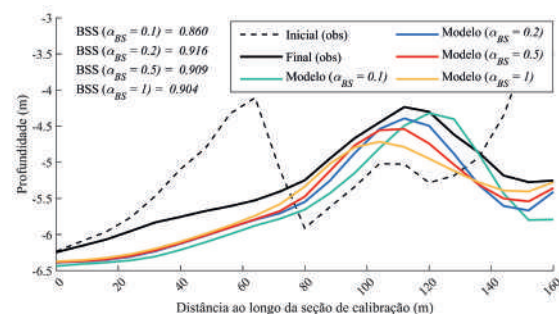


Figura 4 – Perfis verticais da batimetria ao longo da seção de calibração (apresentada na Fig. 2). Calibração do modelo para morfologia. Comparação entre os resultados do modelo para diferentes valores do parâmetro de declividade do fundo (α_{BS} (0,1, 0,2, 0,5 e 1) e batimetria observada. O *Brier skill score* (BSS) para cada resultado do modelo em comparação com a batimetria observada é apresentado no canto superior esquerdo do painel. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

0,916. A Fig. 4 mostra o resultado do modelo para diferentes valores de α_{BS} (0,1, 0,2, 0,5 e 1) considerando a batimetria observada e apresenta os resultados ao longo da seção de calibração.

3.2. Validação do modelo

O modelo foi implementado em uma região de hidrodinâmica e batimetria complexas usando uma abordagem realista que implementa observações como entrada em vez de um modelo idealizado, exigindo a necessidade de validação do modelo comparando os resultados com

observações de campo. A MWL , V e H_s observadas na localização do *quadpod* foram comparados com o resultado do modelo por um período de 50 dias (Fig. 5). O MWL foi previsto pelo modelo (Fig. 5a) com o SS calculado (0,979) e RMSE (0,066 m). Na Fig. 5b, V é representado por valores positivos quando o fluxo se move na direção

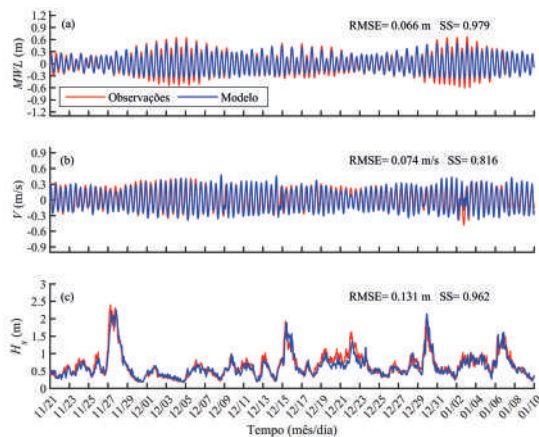


Figura 5 – Comparação entre os resultados do modelo (azul) e as observações coletadas no nó subaquático de 12 m do MVCO (vermelho) para (a) altura da superfície do mar (MWL), (b) velocidade média da corrente (V) com valores positivos indicando que a corrente se move na direção da maré de enchente e valores negativos indicando que a corrente se move na direção da maré de vazante e (c) altura significativa da onda (H_s). O *root mean square error* (RMSE) e o *skill score* (SS) para cada comparação são apresentados no canto superior direito dos painéis. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

da maré de enchente e valores negativos quando o fluxo se move na direção da maré de vazante. O SS de V foi calculado como 0,816 e o RMSE como 0,074 m/s. Para H_s (Fig. 5c), o SS foi calculado como 0,962 e o RMSE como 0,131 m.

Para avaliar qualitativamente os resultados do modelo, as mudanças batimétricas foram calculadas subtraindo a batimetria inicial da batimetria final observada e modelada. A Fig. 6 apresenta os mapas de mudança batimétrica observada e modelada, mostrando a localização de acréscimo de sedimento (em amarelo)

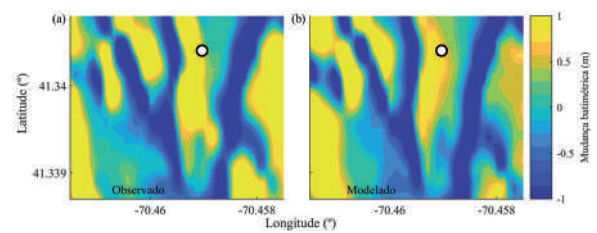


Figura 6 – Mudança batimétrica calculada a partir das batimetrias (a) observada e (b) simulada considerando a diferença entre a batimetria inicial (16 de outubro de 2013) e a batimetria final (10 de janeiro de 2014). Amarelo representa o acréscimo de sedimento e azul representa a erosão. O ponto branco define a localização do *quadpod*. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023) e erosão (em azul). O resultado do modelo representa bem o padrão de mudanças observado, com erosão nas áreas onde as cristas das ondas de areia existiam e deposição de sedimento nas áreas onde a batimetria inicial apresentou depressões.

Além disso, o desempenho do modelo foi avaliado comparando a batimetria final modelada e observada ao longo de sete seções (Fig. 7a). Estas seções paralelas estão orientadas na direção do fluxo médio e separadas por 20 m entre si. Cada seção tem 160 m de comprimento e é composta por 21 pontos igualmente espaçados por 8 m (resolução espacial do modelo), totalizando 147 pontos considerando todas as seções. A Fig. 7b mostra um gráfico de

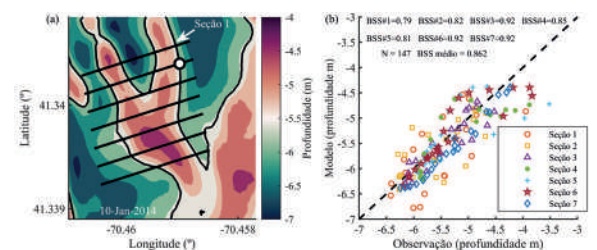


Figura 7 – (a) Resultado do modelo para a batimetria final (10 de janeiro de 2014). As sete seções e a localização do *quadpod* são representadas pelas linhas pretas e pelo ponto branco, respectivamente. (b) Gráfico de dispersão apresentando a batimetria modelada e observada em 10 de janeiro de 2014. A linha tracejada preta representa a proporção 1:1. O *Brier skill score* (BSS) para os resultados do modelo em comparação com a batimetria observada para cada seção é apresentada na parte superior do painel (b). Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)



dispersão comparando a profundidade observada e modelada para estes 147 pontos. O modelo simulou adequadamente a evolução do fundo do mar com um *BSS* médio de 0,862 (considerando todas as seções).

3.3. Estudos de sensibilidade

A comparação entre os perfis das batimetrias observada e modelada ao longo da seção 3 foi realizada para determinar o impacto das ondas de superfície e dos ventos na migração de ondas de areia. Uma rodada de referência com os parâmetros descritos no item 2.2, referida como caso I, inclui as forçantes de maré, onda e vento. Uma rodada subsequente do modelo, caso II,

final observada como uma linha preta; e os perfis finais do caso I, caso II e caso III como linhas azuis, amarelas e vermelhas, respectivamente. A migração de ondas de areia foi para a direita no gráfico (direção nordeste), com uma migração média de 36 m. Para a simulação sem ondas de superfície (caso II), os resultados do modelo mostram uma redução de cerca de 65% da migração de ondas de areia em relação ao caso I, indicando que as ondas de superfície desempenham um papel relevante na migração de ondas de areia na área de estudo. Além disso, os resultados para a simulação sem vento (caso III) indicam cerca de 15% mais migração, o que indica que o vento reduz a migração de ondas de areia durante o experimento.

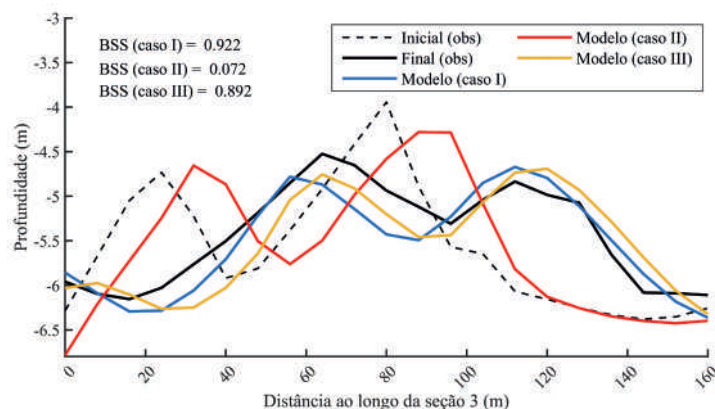


Figura 8 – Perfis de batimetria em 10 de janeiro de 2014 ao longo da seção 3. As linhas representam o resultado do modelo para o caso I, incluindo forçantes de maré, onda e vento (linha azul), caso II, incluindo forçantes de maré e vento (linha amarela) e caso III, incluindo forçantes de maré e onda (linha vermelha). A linha tracejada preta representa a batimetria inicial em 16 de outubro de 2013 e a linha preta sólida denota a batimetria final observada em 10 de janeiro de 2014. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

considera apenas as forçantes de maré e vento (sem ondas de superfície). Finalmente, o caso III inclui forçantes de maré e onda (sem vento). A Fig. 8 apresenta os perfis de batimetria para a seção 3 com a batimetria inicial representada pela linha tracejada preta; a batimetria

4. DISCUSSÃO

4.1. Assimetria de fluxo de maré, vento e ondas de superfície

A assimetria do fluxo de maré é essencial para a migração das ondas de

areia. As células de recirculação no plano vertical geradas pela oscilação da corrente de maré são distorcidas pela assimetria do fluxo de maré. Esta distorção faz com que a convergência de sedimentos não ocorra mais na crista da onda de areia, resultando em um transporte na direção do fluxo

assimétrico e migração da onda de areia (VAN GERWEN *et al.*, 2018). Embora a assimetria do fluxo de maré seja essencial para a migração da onda de areia, o vento e as ondas de superfície também podem ter um impacto substancial na migração da onda de areia (LE BOT &

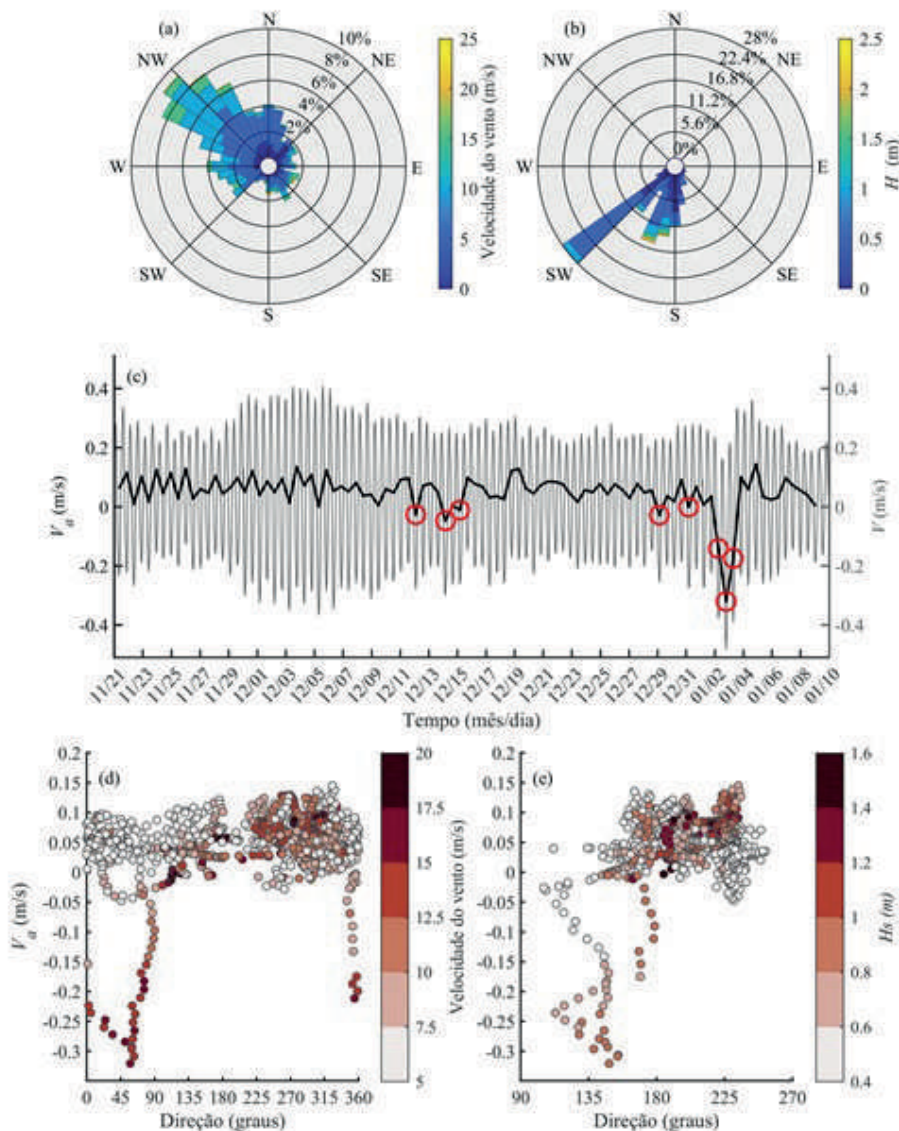


Figura 9 – Histograma radial para (a) dados de vento e (b) ondas de superfície observadas durante o experimento de campo. (c) Assimetria da velocidade de pico da corrente de maré (V_p), em preto, e corrente média na coluna d'água (V), em cinza. Valores positivos indicam que o fluxo se move na direção da maré de enchente (principalmente a leste-nordeste), e valores negativos denotam que o fluxo se move na direção da maré de vazante (principalmente para oeste). Os círculos vermelhos destacam a ocorrência de valores negativos de V_p . Gráfico de dispersão de (d) V_p em relação à direção do vento com cores representando a velocidade do vento; e (e) V_p em relação à direção das ondas com cores representando a altura significativa das ondas (H_s). Os dados de vento foram obtidos da Air-Sea Interaction Tower (ASIT). Correntes e ondas foram observadas na localização do *quadpod*. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)



TRENTESAUX, 2004). O vento durante o experimento de campo foi principalmente de noroeste (Fig. 9a), embora os ventos mais fortes (15-23 m/s) viessem principalmente do sul e sudoeste. A velocidade do vento alcançou uma máxima de 23 m/s e uma velocidade média de 8,8 m/s. As ondas de superfície (Fig. 9b) vêm principalmente do sul e sudoeste, com H_s média de 0,66 m e variando de 0,2 a 2,3 m.

A assimetria da maré pode ser caracterizada pela assimetria da velocidade de pico da corrente de maré (V_a), que é a diferença entre as velocidades máximas de enchente e de vazante no mesmo ciclo (LE BOT & TRENTESAUX, 2004). A Figura 9c mostra as séries temporais de V e V_a na localização do *quadpod*. A partir de V , as velocidades máximas de vazante e de enchente são de -0,48 m/s e 0,41 m/s, respectivamente, com média de -0,23 m/s (vazante) e 0,28 m/s (enchente). Os valores de V_a variam entre -0,32 m/s e 0,15 m/s. Durante a maior parte do período de observação, o V_a apresenta valores positivos (na direção da maré de enchente), exceto por curtos períodos de valores negativos destacados pelos círculos vermelhos, que denotam o V_a na direção da maré de vazante. A média de V_a é de 0,05 m/s na direção da maré de enchente. Valores negativos mais altos de V_a (2-4 de janeiro) correspondem a um período de vento de nordeste com 16 m/s e ondas de sul-sudoeste com H_s de 0,85 m. A variação do V_a e da velocidade do vento em relação à direção do vento, bem como a variação do V_a e do H_s em relação à direção das ondas, são mostradas nas Figuras 9d e 9e.

Valores negativos de V_a estão associados a ventos moderados principalmente de norte a leste e ondas pequenas ($H_s < 1$ m) do sul ao sudeste, indicando que os ventos podem afetar o V_a e impactar a migração das ondas de areia, como mencionado por Le Bot & Trentesaux (2004). A influência das correntes geradas pelo vento na migração das ondas de areia é corroborada pelos resultados do modelo. O caso III (sem vento) apresentou uma migração das ondas de areia 15% maior que o caso I (com vento) (veja Fig. 8) e uma média de V_a 9,8% maior na localização do *quadpod* (não apresentado).

4.2. Influência das correntes de maré e das ondas de superfície na migração das ondas de areia

Para o período da simulação, de 16 de outubro de 2013 a 10 de janeiro de 2014, o modelo produziu mapas batimétricos horários. Para cada mapa batimétrico, um perfil vertical do fundo marinho ao longo da seção 2 foi determinado, a partir do qual a distância e a velocidade de migração das ondas de areia foram estimadas (Figura 10a). A influência das correntes de maré e das ondas de superfície na migração das ondas de areia é avaliada comparando (Figura 10b) parâmetros de Shields para as correntes de maré (θ_t) e ondas de superfície (θ_w) com o parâmetro Shields crítico (θ_{cr}), de forma semelhante a van Dijk & Kleinhans (2005) e Damen *et al.* (2018). A velocidade de migração, θ_t , e θ_w apresentada na Figura 10 foram calculadas usando o resultado do modelo na localização do

$$\theta = \frac{\tau}{(\rho_s - \rho_w)gD_{50}} \quad (4)$$

$$\tau_t = \rho_w g \left[\frac{V}{18 \log_{10} \left(\frac{12d}{2.5D_{50}} \right)} \right]^2 \quad (5)$$

$$\tau_w = \rho_w u_{orb}^2 \exp \left[5.213 \left(\frac{2.5D_{50}}{A_{orb}} \right)^{0.194} - 5.977 \right] \quad (6)$$

quadpod. O valor crítico θ_{cr} foi determinado como uma função do tamanho do grão do sedimento da área de estudo (VAN RIJN, 1993) e usado como um limiar para o movimento inicial do sedimento (SHIELDS,

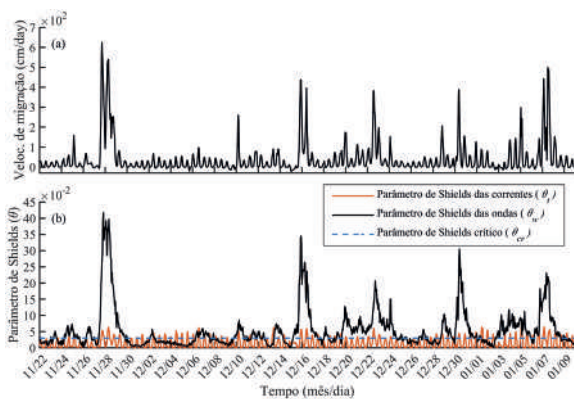


Figura 10 – (a) Média horária da velocidade de migração, (b) parâmetro de Shields para as ondas de superfície (θ_w) e parâmetro de Shields para a corrente de maré (θ_t) séries de tempo. A linha tracejada azul representa o parâmetro de Shields crítico (θ_{cr}) para a iniciação do movimento de sedimentos. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

1936). Os parâmetros de Shields e a tensão de cisalhamento para as correntes de maré (θ_t) e as ondas de superfície (θ_w) foram calculados seguindo van Rijn (1993): onde ρ_s é a densidade do sedimento, ρ_w é a densidade da água salgada, g é a aceleração

gravitacional, d é a profundidade local, u_{orb} é a velocidade orbital da onda e A_{orb} é a excursão orbital da onda perto do fundo.

A média da velocidade de migração ao longo da simulação de 3 meses é de 40,4 cm/dia ao longo da seção 2 e 55,8 cm/dia ao longo da seção 7, o que é coerente com a migração de ondas de areia observadas nos dados batimétricos e com a velocidade média de migração observada de 50 cm/dia durante um período de 9 meses, de 16 de outubro de 2013 a 18 de julho de 2014, relatado por Jones e Traykovski (2019). No entanto, a velocidade de migração estimada não é constante, pois grandes picos na velocidade de migração podem ser observados em 28 de novembro, 16, 22 e 30 de dezembro e 7 de janeiro (Fig. 10a). A velocidade de migração atinge uma máxima de 627,3 cm/dia e alcança mais de 200 cm/dia em várias ocasiões. Os picos menores com espaçamento regular estão relacionados a θ_t e à migração associada pelas correntes de maré. Uma comparação

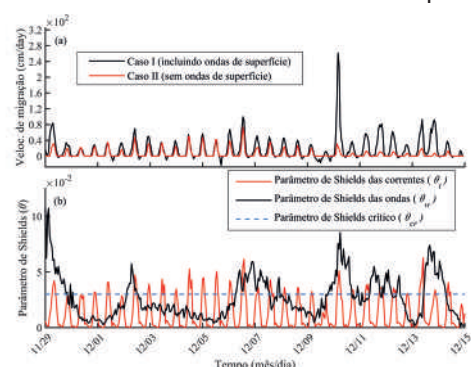


Figura 11 – (a) Média horária da velocidade de migração (b) Parâmetro de Shields para ondas (θ_w) e parâmetro de Shields para a corrente de maré (θ_t) calculados a partir dos resultados do modelo em um período (16 dias) sem grandes eventos de ondas de superfície. A linha tracejada azul representa o parâmetro de Shields crítico (θ_{cr}) para a iniciação do movimento de sedimento. A velocidade média de migração foi estimada a partir de uma simulação que inclui ondas de superfície (curva preta) e de uma simulação sem ondas de superfície (curva vermelha). Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)



qualitativa entre a velocidade média de migração e o parâmetro de Shields (Fig. 10) indica que os picos da velocidade de migração estimada correspondem aos picos de θ_w , que também coincidem com períodos de eventos de ondas quando $H_s > 1,5$ m (Fig. 5c), o que destaca a influência das ondas de superfície na velocidade de migração da onda de areia.

De 29 de novembro a 15 de dezembro de 2013 (16 dias), nenhum grande evento de ondas de superfície ocorreu ($H_s < 1$ m com H_s médio = 0,467 m, veja Fig. 5c), o que é refletido na θ_w relativamente pequena durante esse tempo (Fig. 11b). A Fig. 11a mostra a média horária da velocidade de migração estimada a partir de uma simulação que inclui ondas de superfície (curva preta) e de uma simulação sem ondas de superfície (curva vermelha) durante o período. A simulação, incluindo ondas de superfície, apresentou uma velocidade média de migração de 17 cm/dia, coerente com as observações de campo de $12 \pm 3,6$ cm/dia (intervalo de confiança de 95%) estimado a partir dos dados do sonar instalado no *quadpod* para o mesmo período da simulação (JONES e TRAYKOVSKI, 2019). Para a simulação sem ondas de superfície, a velocidade média de migração é de 5,6 cm/dia, representando uma redução de 67% na velocidade média de migração quando as ondas de superfície são consideradas. A velocidade de migração e θ_t são correlacionados nas simulações com e sem ondas de superfície, com coeficiente de correlação (R) de 0,70 e 0,72, respectivamente. Os picos de velocidade de migração na

simulação que leva em conta as ondas de superfície correspondem a períodos em que θ_w é maior que θ_{cr} (Fig. 11b).

De acordo com Campmans *et al.* (2018), embora os eventos de ondas de superfície não desencadeiem a migração de ondas de areia, eles podem aumentar a migração de ondas de areia na presença de fluxo de maré assimétrico, reduzindo o crescimento de ondas de areia e, eventualmente, reduzindo a altura das ondas de areia. Essas conclusões são resultado de simulações usando um modelo 2DV altamente idealizado considerando condições de tempestade em uma região com profundidade média de água de 30 m. No entanto, quando modelaram a migração de ondas de areia para um cenário mais realista com ondas de superfície em breves intervalos de condições de tempestade alternando com períodos de boas condições climáticas, os resultados foram semelhantes às simulações para a migração de ondas de areia considerando apenas forçamento de maré. Em contraste, o resultado apresentado na Fig. 11 implica que a influência das ondas de superfície em áreas rasas (profundidade de água menor que 10 m) é relevante mesmo durante períodos sem grandes eventos de ondas.

4.3. Rotação da onda de areia

A comparação entre a batimetria inicial observada e final (Fig. 2) exibe uma rotação anti-horária da onda de areia, onde a porção sul da onda de areia migra mais rápido do que a porção norte. A Fig. 12 apresenta uma comparação entre duas simulações, a primeira

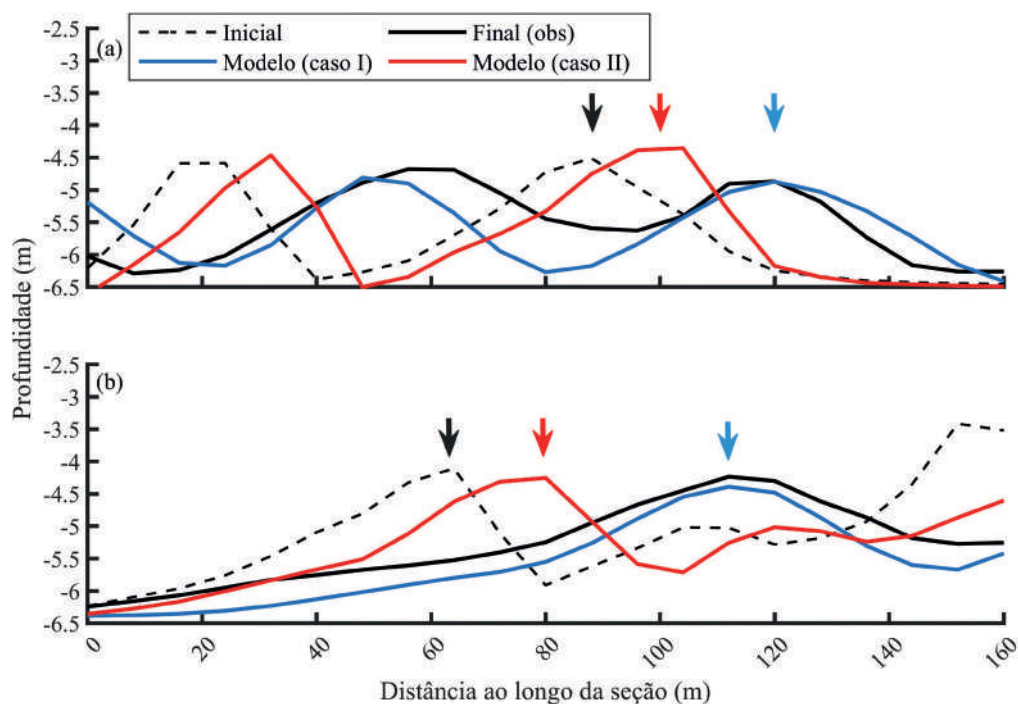


Figura 12 – Perfis de batimetria ao longo da (a) seção 1 e (b) seção 7. A batimetria em 16 de outubro de 2013 e 10 de janeiro de 2014 estão mostradas como as curvas pretas tracejadas e sólidas, respectivamente. A linha azul representa o resultado do modelo para o caso I, incluindo ondas de superfície, e a linha vermelha, para o caso II, simulação sem ondas de superfície. A seta preta indica a posição inicial observada da crista da onda de areia, as setas azuis e vermelhas indicam a posição final modelada da mesma onda de areia para os casos I e II, respectivamente. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

incluindo ondas de superfície (caso I) e a segunda uma simulação sem ondas de superfície (caso II) ao longo da seção 1 (porção norte da onda de areia) e da seção 7 (porção sul). Para o caso I, a migração da onda de areia ao longo da seção 7 é de 48 m (distância entre as setas preta e azul), o que é 16 m mais longe do que a migração na seção 1 (32 m). Ambas as seções para o caso II subestimaram a migração e a rotação da onda de areia, conforme evidenciado pela migração reduzida, distância entre as setas preta e vermelha, nas seções 1 (12 m) e 7 (16 m).

A rotação da onda de areia foi atribuída à variação espacial das velocidades de migração relacionada à profundidade,

já que as velocidades de migração tendem a ser mais lentas em locais mais profundos e mais rápidas em áreas mais rasas, o que causa a alteração do eixo original da onda de areia (TONNON *et al.*, 2007). Em áreas rasas, a aceleração da corrente devido à conservação de energia aumenta a variação espacial da corrente de maré, impactando a velocidade de migração da onda de areia, juntamente com a rotação da onda de areia. Um efeito semelhante na variação espacial da velocidade de migração da onda de areia é causado pelos movimentos orbitais das ondas de superfície, que agitam o sedimento no fundo do mar em áreas rasas quando as ondas de superfície são



suficientemente vigorosas (TONNON *et al.*, 2007); este agitação pode amplificar a migração (CAMPMANS *et al.*, 2018).

Os parâmetros de Shields (θ_w e θ_t) foram calculados na área de interesse para examinar o impacto da corrente e das ondas de superfície na migração e rotação da onda de areia. A Fig. 13 mostra os mapas de θ_w para a condição de ondas grandes ($H_s = 2.4$ m) e para a condição de ondas pequenas ($H_s = 0.5$ m) e os mapas de θ_t para as condições de máxima corrente ($V = 0.41$ m/s) durante as condições de maré

de sizígia e as condições de corrente média, considerando a média dos picos de corrente de maré ($V = 0.28$ m/s). Os maiores valores de θ_w e θ_t são alcançados para as condições de ondas grande e de corrente máxima, nas quais o parâmetro de Shields excede o θ_{cr} em toda a área de interesse (Fig. 13a e 13c). Em contraste, θ_w e θ_t não excedem os valores de θ_{cr} nas áreas destacadas em cinza (Fig. 13b e 13d) para as condições de ondas pequenas e correntes médias. Todos os mapas apresentam valores mais altos do parâmetro de Shields para

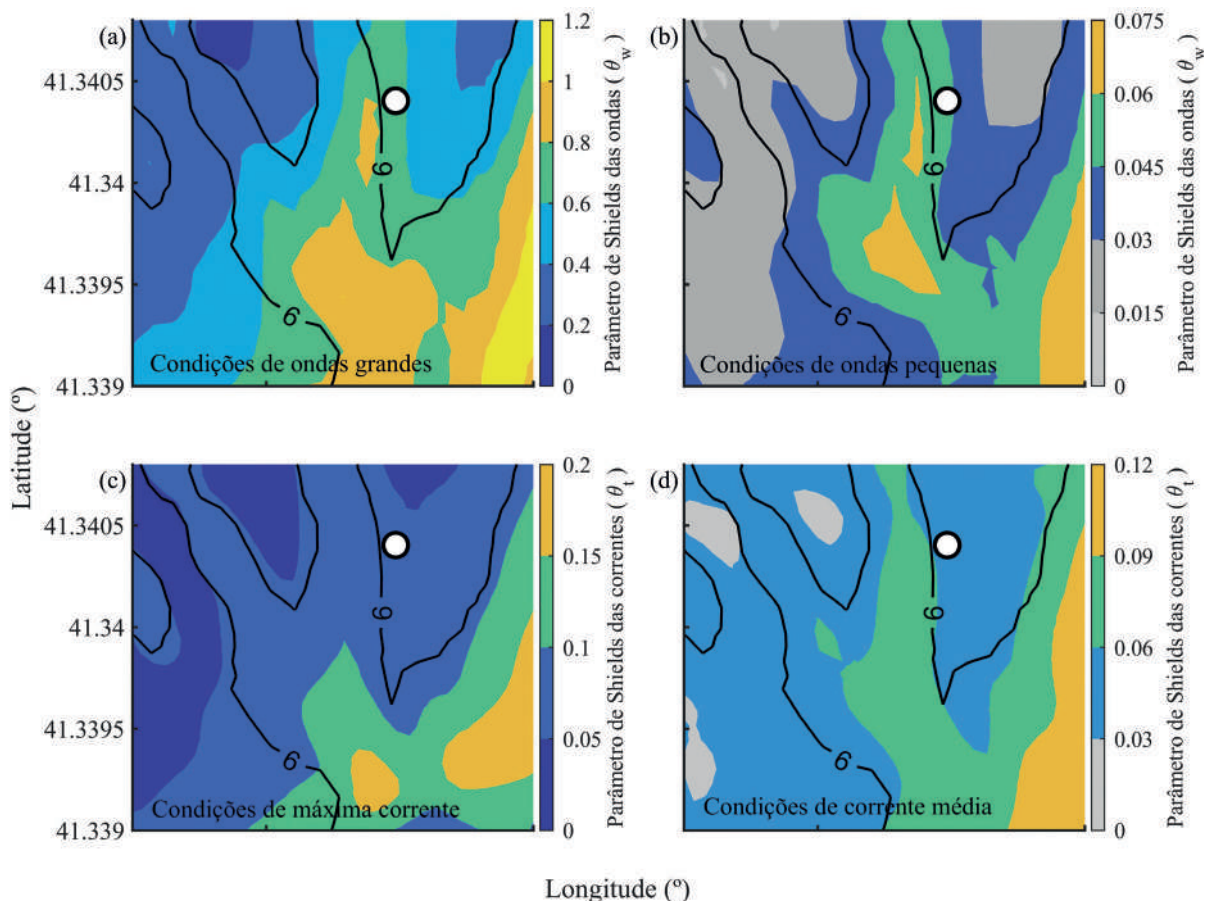


Figura 13 – Mapa do parâmetro de Shields (θ_w) para as ondas para (a) condição de ondas grandes ($H_s = 2,4$ m) e (b) condição de onda pequena ($H_s = 0,5$ m), e mapa do parâmetro de Shields (θ_t) para correntes de marés para (c) condições de corrente máxima ($V = 0,41$ m/s) e (d) condições de corrente média ($V = 0,28$ m/s). A linha preta representa o contorno de 6 m de profundidade e o local do *quadpod* é denotado pelo ponto branco. Adaptado de Pessanha *et al.* (2023)

a porção sul, onde foi observada uma maior velocidade de migração. Esses resultados revelam que os efeitos combinados do fluxo de maré e das ondas de superfície causam uma velocidade de migração mais rápida na porção sul, forçando a onda de areia a girar no sentido anti-horário.

5. CONCLUSÕES

A migração de ondas de areia na Wasque Shoals, ao largo da costa de Martha's Vineyard, foi examinada por meio da análise de dados observacionais e dos resultados do modelo Delft3D, o qual é capaz de simular correntes, ondas, transporte de sedimento, e mudanças morfológicas. O principal objetivo foi implementar um modelo usando a abordagem 3D que representasse de forma precisa a dinâmica das ondas de areia próximas à costa. Além disso, os processos físicos responsáveis pela alta velocidade de migração dessas ondas na área de estudo foram investigados.

As comparações entre a saída do modelo e as observações de campo indicam que o modelo descreveu corretamente a hidrodinâmica na área de estudo, pois o parâmetro *skill score* para altura da superfície do mar, velocidade da corrente e altura significativa das ondas foram 0,979, 0,816 e 0,962, respectivamente. Além disso, a capacidade do modelo de representar a evolução do fundo do mar foi verificada ao comparar as mudanças batimétricas observadas e simuladas. A comparação entre a batimetria simulada e a batimetria final observada revela que o modelo reproduziu satisfatoriamente a

evolução do fundo do mar, com um *Brier Skill Score* médio de 0,862.

Os efeitos das ondas de superfície e do vento na migração das ondas de areia foram avaliados ao rodar o modelo para diferentes cenários. A simulação sem ondas de superfície (caso II) apresentou 65% menos migração do que uma simulação que incluía ondas de superfície (caso I), o que mostra que as ondas de superfície aumentam significativamente a migração das ondas de areia. Além disso, uma simulação sem vento (caso III) superestimou a migração em 15%, indicando que o vento diminui a migração das ondas de areia durante o experimento.

A velocidade de migração das ondas de areia modelada está correlacionada com o parâmetro de Shields para as correntes ($R = 0,7$). Além disso, os resultados do modelo indicam que os aumentos rápidos na migração das ondas de areia estão associados com o aumento no parâmetro de Shields para as ondas, mostrando que as ondas de superfície aumentam a velocidade de migração das ondas de areia. Comparação entre o parâmetro de Shields para as ondas e a velocidade de migração simulada para um período sem grandes eventos de ondas de superfície mostram que o efeito das ondas da superfície em áreas rasas pode ser importante mesmo quando as ondas são menores. A rotação de ondas de areia no sentido anti-horário foi associada à combinação dos efeitos das correntes de maré, ondas da superfície e variação da batimetria.

Pela primeira vez é apresentado um modelo tridimensional, usando



Delft3D, em uma área de água rasa, com uma velocidade média de migração de ondas de areia de 50 cm/dia e observações, incluindo rotação de ondas de areia. Outros estudos nesta área normalmente adotam modelos no enfoque 2DV e, na maioria das vezes, simplificações, incluindo batimetria idealizada. Além disso, considerando a batimetria complexa observada, as ondas de superfície, as forçantes de maré e vento tornam este estudo único para áreas com profundidades locais menores que 10 m. As ondas de superfície não são capazes de iniciar a migração de ondas de areia, que é causada pela assimetria da maré. No entanto, os resultados deste trabalho sugerem que a migração rápida de ondas de areia observada nas Wasque Shoals, com pelo menos uma ordem de magnitude maior

do que muitos estudos anteriores, é muito acelerada pelo forçamento das ondas e devido à natureza da batimetria da área de estudo. Além disso, as simulações demonstram que a profundidade relativamente rasa torna a influência das ondas de superfície importante mesmo durante períodos menos energéticos ($H_s < 1$ m). Portanto, embora as correntes assimétricas sejam essenciais para a migração de ondas de areia, os resultados do modelo associados com a análise das observações permitem confirmar que em profundidades rasas os eventos de ondas são em grande parte responsáveis por períodos de migração e rotação rápidas. Embora isso possa se aplicar a áreas costeiras com condições hidrodinâmicas semelhantes, é necessário mais estudo para generalizar essas descobertas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aliotta, S., & Perillo, G. M. E. (1987). A sand wave field in the entrance to Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Marine Geology*, 76(C), 1–14. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(87\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(87)90013-2)

Bagnold, R. A. (1966). *An approach to the sediment transport problem from general physics*. U. S. Govt. Print. Off. <https://doi.org/10.3133/pp4221>

Barnard, P. L., Hanes, D. M., Rubin, D. M., & Kvitek, R. G. (2006). Giant sand waves at the mouth of San Francisco Bay. *Eos*, 87(29), 285–289. <https://doi.org/10.1029/2006eo290003>

Battjes, J. A., & Janssen, J. P. F. M. (1978). Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(16), 32. <https://doi.org/10.9753/icce.v16.32>



Bellec, V. K., Bøe, R., Bjarnadóttir, L. R., Albretsen, J., Dolan, M., Chand, S., Thornes, T. Jakobsen, F. W., Nixon, C., Plassen, L., Jensen, H. Nicole, B., Olsen, H., & Elvenes, S. (2019). Sandbanks, sandwaves and megaripples on Spitsbergenbanken, Barents Sea. *Marine Geology*, 416. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2019.105998>

van den Berg, J., Sterlini, F., Hulscher, S. J. M. H., & van Damme, R. (2012). Non-linear process based modelling of offshore sand waves. *Continental Shelf Research*, 37, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2012.01.012>

Besio, G., Blondeaux, P., Brocchini, M., Hulscher, S. J. M. H., Idier, D., Knaapen, M. A. F., Németh, A. A., Roos, P.C., & Vittori, G. (2008). The morphodynamics of tidal sand waves: A model overview. *Coastal Engineering*, 55(7–8), 657–670. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.11.004>

Besio, Giovanni, Blondeaux, P., Brocchini, M., & Vittori, G. (2004). On the modeling of sand wave migration. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(4). <https://doi.org/10.1029/2002JC001622>

Blondeaux, P., & Vittori, G. (2016). A model to predict the migration of sand waves in shallow tidal seas. *Continental Shelf Research*, 112, 31–45. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.11.011>

Boggs, S. (1974). Sand-Wave Fields in Taiwan Strait. *Geology*, 2(5), 251–253. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1974\)2<251:SFITS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1974)2<251:SFITS>2.0.CO;2)

Borsje, B. W., Roos, P. C., Kranenburg, W. M., & Hulscher, S. J. M. H. (2013). Modeling tidal sand wave formation in a numerical shallow water model: The role of turbulence formulation. *Continental Shelf Research*, 60, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.04.023>

Borsje, B. W., Kranenburg, W. M., Roos, P. C., Matthieu, J., & Hulscher, S. J. M. H. (2014). The role of suspended load transport in the occurrence of tidal sand waves. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(4), 701–716. <https://doi.org/10.1002/2013JF002828>

Le Bot, S., & Trentesaux, A. (2004). Types of internal structure and external morphology of submarine dunes under the influence of tide- and wind-driven processes



(Dover Strait, northern France). *Marine Geology*, 211(1–2), 143–168. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.002>

Campmans, G. H. P., Roos, P. C., de Vriend, H. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2018). *The Influence of Storms on Sand Wave Evolution: A Nonlinear Idealized Modeling Approach*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(9), 2070–2086. <https://doi.org/10.1029/2018JF004616>

Chu, P. C., Pessanha, V. S., Fan, C., & Calantoni, J. (2021). *Coupled delфт3D-object model to predict mobility of munition on sandy seafloor*. *Fluids*, 6(9), 330. <https://doi.org/10.3390/fluids6090330>

Chu, P. C., Fan, C., Calantoni, J., & Sheremet, A. (2022). *Prediction of Mobility and Burial of Objects on Sandy Seafloor*. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 47(1), 111–125. <https://doi.org/10.1109/JOE.2021.3098391>

Damen, J. M., Van Dijk, T. A. G. P., & Hulscher, S. J. M. H. (2018). *Spatially Varying Environmental Properties Controlling Observed Sand Wave Morphology*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123, 262–280. <https://doi.org/10.1002/2017JF004322>

Damveld, J. H., Borsje, B. W., Roos, P. C., & Hulscher, S. J. M. H. (2020). *Horizontal and Vertical Sediment Sorting in Tidal Sand Waves: Modeling the Finite-Amplitude Stage*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10). <https://doi.org/10.1029/2019JF005430>

Deltares. (2022). *Delft3D-Flow: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments, User Manual*. Delft, Netherlands. Retrieved from https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf

Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). *Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOB0>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOB0>2.0.CO;2)

Fang, H.W., & Wang, G.Q. (2000). *Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (8), 578-592. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2000\)126:8\(578\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2000)126:8(578))



Fang, H.W., & Rodi, W. (2003). Three-dimensional calculations of flow and suspended sediment transport in the neighborhood of the dam for the three gorges project (TGP) reservoir in the Yangtze River. *Journal of Hydraulic Research*, 41(4), 379-394. <https://doi.org/10.1080/00221680309499983>

Hasselmann, K. (1974). On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, 6(1-2), 107-127. <https://doi.org/10.1007/BF00232479>

Hasselmann, K.F., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H.C., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Müller, P.M., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., & Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A*, 8,1-95.

Hopkins, J., Elgar, S., & Raubenheimer, B. (2017). Flow separation effects on shoreline sediment transport. *Coastal Engineering*, 125, 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.04.007>

Hopkins, J., Elgar, S., & Raubenheimer, B. (2018). Storm Impact on Morphological Evolution of a Sandy Inlet. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(8), 5751-5762. <https://doi.org/10.1029/2017JC013708>

Hulscher, S. J. M. H. (1996). Tidal-induced large-scale regular bed form patterns in a three-dimensional shallow water model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 101(C9), 20727-20744. <https://doi.org/10.1029/96JC01662>

Jones, K. R., & Traykovski, P. (2019). Interaction of Superimposed Megaripples and Dunes in a Tidally Energetic Environment. *Journal of Coastal Research*, 35(5), 948-958. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00084.1>

Khosronejad, A., Kang, S., Farhadzadeh, A., & Sotiropoulos, F. (2020). On the genesis and evolution of barchan dunes: Hydrodynamics. *Physics of Fluids*, 32(8), 086602. <https://doi.org/10.1063/5.0015515>

Kimball, P., Bailey, J., Das, S., Geyer, R., Harrison, T., Kunz, C., Manganini, K., Man-koff, K., Sayre-McCord, T., Straneo, F., & Traykovski, P. (2015). *The WHOI Jetyak:*



An autonomous surface vehicle for oceanographic research in shallow or dangerous waters. In 2014 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, AUV 2014. <https://doi.org/10.1109/AUV.2014.7054430>

Krabbendam, J., Nnafie, A., de Swart, H., Borsje, B., & Perk, L. (2021). Modelling the past and future evolution of tidal sand waves. Journal of Marine Science and Engineering, 9(10), 1071. <https://doi.org/10.3390/jmse9101071>

Leenders, S., Damveld, J. H., Schouten, J., Hoekstra, R., Roetert, T. J., & Borsje, B. W. (2021). Numerical modelling of the migration direction of tidal sand waves over sand banks. Coastal Engineering, 163. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103790>

Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. Coastal Engineering, 51(8–9), 883–915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>

Li, Y., Lin, M., Jiang, W. B., & Fan, F. X. (2011). Process control of the sand wave migration in Beibu Gulf of the South China Sea. Journal of Hydrodynamics, 23(4), 439–446. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60134-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60134-5)

Liu, Y., Fang, H., Huang, L., & He, G. (2019). Numerical simulation of the production of three-dimensional sediment dunes. Physics of Fluids, 31(9), 096603. <https://doi.org/10.1063/1.5108741>

Németh, A. A., Hulscher, S. J. M. H., & Van Damme, R. M. J. (2007). Modelling offshore sand wave evolution. Continental Shelf Research, 27(5), 713–728. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.11.010>

Németh, A. A., Hulscher, S. J. M. H., & De Vriend, H. J. (2002). Modelling sand wave migration in shallow shelf seas. Continental Shelf Research, 22 (18-19), 2795–2806. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00127-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00127-9)

NOAA/NGDC. (1999). U.S. Coastal Relief Model Vol.1- Northeast Atlantic. Retrieved July 26, 2022, from <https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.dem:713>

Pessanha, V. S., Chu, P. C., Gough M. K., Traykovski, P., Orescanin, M. M. (2023). Sand wave migration near the southeastern corner of Martha's Vineyard, Massachusetts,



USA. *International Journal of Sediment Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2023.04.006>

Roelvink, D. J. A. & Walstra, D. J. (2005). *Keeping it simple by using complex models*. *Advances in Hydroscience and Engineering*, 6, 1–11.

Shields, A. (1936). *Application of Similarity Principles and Turbulence Research to Bed-load Movement (translated version)*. *Hydrodynamics Laboratory*, 167.

Tonnon, P. K., van Rijn, L. C., & Walstra, D. J. R. (2007). *The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface*. *Coastal Engineering*, 54(4), 279–296. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.08.005>

Traykovski, P. A., & Austin, T. (2017). *Continuous Monitoring of Mobility, Burial and Re-exposure of Underwater Munitions in Energetic Nearshore Environments (Report No. MR-2319)*. Alexandria, VA. Retrieved from <https://www.serdp-estcp.org/Program-Areas/Munitions-Response/Munitions-Underwater/MR-2319>

van Dijk, T. A. G. P., & Kleinhans, M. G. (2005). *Processes controlling the dynamics of compound sand waves in the North Sea, Netherlands*. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(4). <https://doi.org/10.1029/2004JF000173>

van Gerwen, W., Borsje, B. W., Damveld, J. H., & Hulscher, S. J. M. H. (2018). *Modelling the effect of suspended load transport and tidal asymmetry on the equilibrium tidal sand wave height*. *Coastal Engineering*, 136, 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.01.006>

van Rijn, L. C., Walstra, D. J. R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., & Sierra, J. P. (2003). *The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based Profile models*. *Coastal Engineering (Amsterdam)*, 47(3), 295–327. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00120-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00120-5)

van Rijn, L. C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands.

Verboom, G. K., & Slob, A. (1984). *Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional shallow water flow problems*. *Advances in Water Resources*, 7(4), 192–197. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(84\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(84)90018-6)



Wang, Z., Liang, B., Wu, G., & Borsje, B. W. (2019). Modeling the formation and migration of sand waves: The role of tidal forcing, sediment size and bed slope effects. *Continental Shelf Research*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103986>

Willmott, C. J. (1981). On the Validation of Models. *Physical Geography*, 2(2), 184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>

Xu, J. P., Wong, F. L., Kvitek, R., Smith, D. P., & Paull, C. K. (2008). Sandwave migration in Monterey Submarine Canyon, Central California. *Marine Geology*, 248(3–4), 193–212. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2007.11.005>





MODELAGEM HIDRODINÂMICA 2D DA REGIÃO COSTEIRA DE CABO FRIO/RJ EM APOIO AO SISTEMA TÁTICO DE FATORES AMBIENTAIS – STFA

Marcos Henrique Maruch Tonelli¹

Victor Bastos Daher²

Thiago Silva Baron³

Fernando Ribeiro⁴

Augusto Pereira⁵

Marcia Helena Moreira Valente⁶

RESUMO

O projeto STFA (Sistema Tático de Fatores Ambientais) tem por objetivo apresentar um sistema de consulta rápida e amigável com informações detalhadas do cenário físico marinho de modo a auxiliar o planejamento de operações navais, viabilizar o monitoramento costeiro de regiões de interesse para a Marinha do Brasil, bem como subsidiar setores da sociedade civil vinculados à pesquisa e à utilização do mar. O desenvolvimento do STFA prevê a manipulação dos dados oceanográficos qualificados através da análise objetiva e a utilização da modelagem hidrodinâmica como alicerces para fornecer climatologias no entorno estratégico da Amazônia Azul, com detalhamento na ZEE que vai de Santos/SP a Vitória/ES. Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares das simulações numéricas 2D utilizando o modelo *Advanced Circulation* (ADCIRC) para a região oceânica adjacente aos municípios de Cabo Frio/RJ e Arraial do Cabo/RJ.

¹ Oficial da Reserva de 3ª Classe; Oceanógrafo. Doutor em Oceanografia Física pela USP. Email: marcos.tonelli@marinha.mil.br

² Oficial da Reserva de 3ª Classe; Oceanógrafo. Doutor em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: victor.daher@marinha.mil.br

³ Oficial do Corpo de Engenheiros; Engenheiro Mecânico. Mestrando em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: thiago.baron@marinha.mil.br

⁴ Oficial do Quadro Técnico; Oceanógrafo. Mestre em Oceanografia Física pela UFSC. Email: fernando-ribeiro.fr@marinha.mil.br

⁵ Oceanógrafo. Mestre em Oceanografia Física pela USP. Email: augustoceano@gmail.com

⁶ Oficial do Quadro Técnico; Oceanógrafa. Doutora em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ. Email: marcia.helena@marinha.mil.br



O ADCIRC reproduziu de maneira satisfatória a circulação na região de estudo, bem como o efeito da maré na dinâmica local. O erro quadrático médio computado entre dados de marégrafo e FES2014+HYCOM (condições de contorno) foi de 5,2 cm e de 3,4 cm quando calculado entre o marégrafo e o ADCIRC. O coeficiente de correlação entre os dados de marégrafo e os dados simulados foi de 0,99 para os dois casos. A utilização de resultados do FES2014 associados ao HYCOM-NCODA no contorno se mostrou uma estratégia eficiente para avaliar a hidrodinâmica regional.

Palavras-chave: Sistema Tático de Fatores Ambientais; STFA; ADCIRC.

ABSTRACT

The STFA project (Tactical System of Environmental Factors) aims to provide a friendly system for prompt access to detailed information on ocean physical parameters in support of naval operations, coastal monitoring of strategic regions for the Brazilian Navy, as well as to support civil sectors linked to research and uses of the sea. STFA builds upon the processing of qualified oceanographic data using objective analysis techniques and numerical modeling as the base to produce met-ocean climatologies across the Amazônia Azul area, with the detailed information provided within Brazil's exclusive economic zone, between Santos/SP and Vitória/ES. This work presents preliminary results from 2D hydrodynamical modeling experiments using the Advanced Circulation Model (ADCIRC) for the coastal region of

Cabo Frio/RJ, and Arraial do Cabo/RJ. ADCIRC was able to reproduce the main features of the local ocean circulation, and to capture the impact of tidal oscillations on local dynamics. A root mean square of 5.2 cm was computed between tidal gauge data and boundary conditions (FES2014+HYCOM) and 3.4 cm between the gauge data and ADCIRC. The correlation coefficient for both cases is 0.99. The results also suggest that using boundary conditions extracted from FES2014 and HYCOM-NCODA for 2D modeling applications may be an efficient first approach to assess regional hydrodynamics, since it is computationally inexpensive and somewhat uncomplicated to setup.

Keywords: Tactical System of Environmental Factors; STFA; ADCIRC.

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA) originou-se da necessidade de integração das informações ambientais das Cartas Temáticas de Fatores Físicos (desenvolvidas pelo Centro de Hidrografia da Marinha – CHM) e do Sistema Tático Ambiental (desenvolvido pelo Instituto de Estudos do Mar Paulo Moreira – IEAPM), com objetivo de oferecer ao setor operativo um sistema único de consulta das informações ambientais do meio marinho para diversos usos.

Contudo, diante da singular vocação do IEAPM para o conhecimento do mar e dos desafios impostos para a retomada do crescimento econômico do país, julgou-se oportuno atualizar o STFA de

modo a atender a outros setores vinculados ao estudo e a utilização do mar, como navegação, pesca, turismo, geração de energia renovável, extração de petróleo e gás, comércio exterior, além da investigação de recursos naturais e biodiversidade ainda inexplorados.

Além de colaborar com as tarefas estratégicas de “negação do uso do mar” e “controle de áreas marítimas”, atribuídas à Marinha do Brasil (MB) na Estratégia Nacional de Defesa (END), o STFA, assumindo um caráter dual, propiciará maior estímulo à investigação científica, à produção de conhecimento e à obtenção de resultados inovadores, indo ao encontro do estabelecido na Estratégia Nacional de CT&I (2016-2022): “o conhecimento científico dos oceanos, das zonas costeiras e de águas interiores é pré-requisito para a adequada gestão, proteção e utilização sustentável de seus recursos [...]”.

Com efeito, adotando uma abordagem multidisciplinar, o STFA enumera objetivos e metas estratégicas, tanto na área científica e de inovação quanto na área de defesa, como o “Conhecimento do Mar” e “Independência Estrangeira”, visando diminuir a lacuna que separa o Brasil dos países mais desenvolvidos no âmbito do conhecimento e aproveitamento sustentável dos oceanos.

Nesse contexto, o escopo do STFA compreende dois objetivos principais:

a) Fornecer um *software* de consulta rápida e amigável, que contenha informações detalhadas do cenário físico e variáveis meteoceanográficas, como elemento de auxílio às decisões táticas, ao planejamento das Operações Distritais

e Navais, na confecção de produtos que exijam uma avaliação do meio ambiente marinho ou de apoio jurídico;

b) Viabilizar o monitoramento de processos costeiros em locais e regiões de interesse da Marinha do Brasil, buscando a nacionalização dos sistemas de aquisição de dados e propondo modelos dinâmicos para situações características ou para alguma necessidade específica.

Atualmente, o STFA é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para variáveis ambientais: temperatura da água do mar, salinidade, velocidade do som na água, densidade, temperatura na camada de mistura, profundidade de camada, gradiente térmico da termoclina, temperatura do ar, pressão atmosférica ao nível do mar, umidade relativa do ar, vento, precipitação, altura significativa de ondas, batimetria e tipo de fundo.

Essas variáveis compõem a Base de Dados Qualificada do IEAPM (BDAQ), que agrega dados oceanográficos (temperatura e salinidade) qualificados por meio do Sistema de Carga e Registro de Dados Oceanográficos (CARGO) obtidos pelo lançamento de CTDs (*Conductivity, Temperature, and Depth*) e XBTs (*eXpendable BathyThermograph*), flutuadores ARGO e *Gliders* durante comissões realizadas por navios da Marinha do Brasil, e por comissões de oportunidade de navios nacionais ou estrangeiros.

A nova versão do STFA prevê diversas metas que compreendem desde a atualização de módulos já desenvolvidos, como o CARGO, até a utilização de técnicas de Análise Objetiva de Múltiplas Escalas e modelagem numérica hidrodinâmica visando



aprimorar a resolução e qualidade das climatologias oceânicas disponibilizadas pelo sistema. Aqui serão apresentados os resultados preliminares dos estudos de modelagem hidrodinâmica 2D utilizando modelo numérico *Advanced Circulation* (ADCIRC) para a região costeira adjacente aos municípios de Cabo Frio e Arraial do Cabo, Rio de Janeiro – Brasil. O domínio foi escolhido considerando a relevância científica desta região que se caracteriza pela ocorrência do fenômeno da ressurgência.

2. METODOLOGIA

A fase inicial dos estudos de modelagem hidrodinâmica desenvolvidos no âmbito do projeto STFA consiste da utilização do módulo 2D do modelo ADCIRC para realizar simulações numéricas da região oceânica localizada entre os municípios de Maricá e Cabo de São Tomé, no estado do Rio de Janeiro, pois esta é uma região de grande interesse oceanográfico por apresentar, em seu centro, uma área de intensa ressurgência costeira (CALADO *et al.*, 2010; CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO *et al.*, 2004; PALÓCZY *et al.*, 2014).

A ressurgência de Cabo Frio é caracterizada pelo movimento ascendente da Água Central do Atlântico Sul (ACAS), água fria e rica em nutrientes, que escocia pelas camadas de fundo da plataforma continental, ascendendo devido a divergência costeira gerada pelos ventos de NE associada à dinâmica de Ekman, bem como pela presença da costa (KÄMPF & CHAPMAN, 2016; ALLARD, 1955; EMÍLSSON, 1961; IKEDA *et al.*, 1974). Além do regime de ventos, outros fatores

atuam no estabelecimento do fenômeno da ressurgência em Cabo Frio: variações sazonais da posição da Corrente do Brasil (CB), a dinâmica associada aos meandros da CB, o bombeamento de Ekman ao longo da plataforma continental (STRAMMA & PETERSON, 1990; SIGNORINI, 1978; CAMPOS *et al.*, 2000; CASTELAO & BARTH, 2006).

A ACAS é uma massa de água fria (6°C e 20°C), salina (34,6 e 36,2) e rica em nutrientes (CASTRO *et al.*, 2006; MIRANDA, 1985). Por um lado, a intrusão dessa água impacta o regime oceanográfico devido à formação de gradientes baroclínicos ao longo da plataforma continental, por outro, afeta a produtividade primária e os níveis mais altos da teia trófica por meio do transporte de nutrientes das camadas profundas para a zona fótica (CALIL ELIAS, 2009; COELHO-SOUZA *et al.*, 2012, PEREIRA *et al.*, 2009; 2010).

2.1. Modelo Numérico *Advanced Circulation* (ADCIRC)

O ADCIRC foi desenvolvido por Luettich & Westerink (1992) e é atualizado e otimizado por diversos colaboradores. O modelo resolve as equações do movimento para fluido em sistema em rotação, com discretização no espaço utilizando o método de elementos finitos e, no tempo, diferenças finitas. O ADCIRC é utilizado por instituições ao redor do globo para realizar modelagem hidrodinâmica e de transporte de sedimentos em duas dimensões (integrado na vertical) ou em três dimensões. O Sistema de Previsão

Ambiental Marinha (PAM) do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) e o programa mantido pelo *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), denominado *Coastal Emergency Risks Assessment* (CERA, <http://cera.cct.lsu.edu/>), são dois exemplos de órgãos que utilizam o ADCIRC para a previsão de correntes, nível e riscos de inundação. Como forçantes, o ADCIRC inclui informações de nível ou velocidade, vento, pressão atmosférica, maré potencial e maré terrestre. Atualmente, o modelo permite a utilização da biblioteca MPI para rodadas em paralelo, aumentando sua eficiência em mais de 90%.

A malha de modelagem desenvolvida para a presente simulação possui 3438 nós de cálculo, formando 6469 elementos triangulares com resolução espacial que varia de 9.3 km no contorno oceânico a 200 m junto aos contornos de terra (Figura 1). A batimetria utilizada foi digitalizada tendo como base as cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN).

Como condições de contorno foram utilizados resultados de nível do mar extraídos do modelo global HYCOM-NCODA e 31 constantes harmônicas de maré do modelo global de maré FES2014. Essas duas fontes de dados foram utilizadas para calcular o nível do mar composto pelo nível astronômico (devido à maré astronômica) e nível não astronômico (variação do nível do mar sem considerar a maré astronômica). Para cada ponto do contorno oceânico foi construída uma série temporal de nível do mar. Como forçantes atmosféricas foram utilizados dados de vetor vento e pressão atmosférica do modelo ECMWF.

A simulação foi realizada entre 7 de novembro de 2022 e 12 de novembro de 2022, período em que o Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura (H-11), da Marinha do Brasil, apoiou uma comissão oceanográfica na região de estudo, lançando um sistema de fundeio com um medidor de correntes ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*) junto ao fundo. Esses dados observados possibilitaram a validação dos resultados da simulação. Adicionalmente, o processo de validação utilizou dados de altura da superfície livre do mar coletados pelo marégrafo do sistema IARA (Interface de Acompanhamento Remoto do Ambiente Marinho) desenvolvido e mantido pelo IEAPM no cais do Porto do Forno, na Enseada do Anjos, em Arraial do Cabo, no RJ.

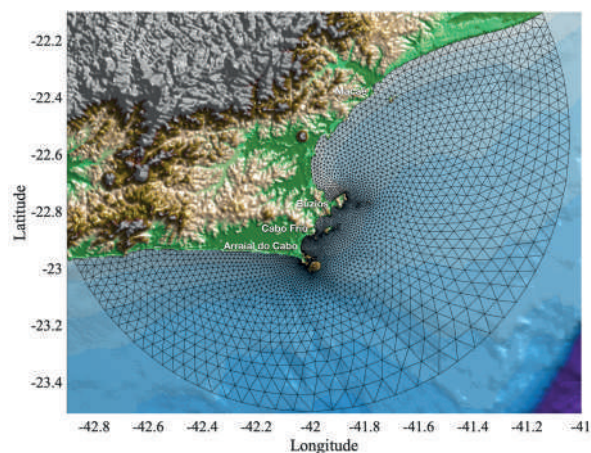


Figura 1 – Domínio de modelagem hidrodinâmica 2D. A resolução da grade varia de 9.3 km no contorno oceânico a 200 m junto aos contornos de terra. A malha contém 3438 nós de cálculo com 6469 elementos triangulares

3. RESULTADOS

Os resultados de nível do mar do modelo costeiro demonstram que o ADCIRC propaga a maré do contorno oceânico para a região interna da Enseada do Anjos



de forma eficiente, visto que esses resultados são sensivelmente mais próximos ao nível medido pelo marégrafo do IARA do que os resultados de altura da superfície livre do mar gerados por simulações de modelos globais (Figura 2). O cálculo do RMS (*root mean square*) entre o marégrafo e FES2014+HYCOM é de 5.2 cm, enquanto o RMS calculado entre o marégrafo e o ADCIRC é de 3.4 cm, evidenciando a capacidade do ADCIRC de propagar o sinal do contorno para as regiões internas e mais rasas do domínio de simulação. Em ambos os casos, o coeficiente de correlação entre os dados do marégrafo e os dados simulados foi de 0,99.

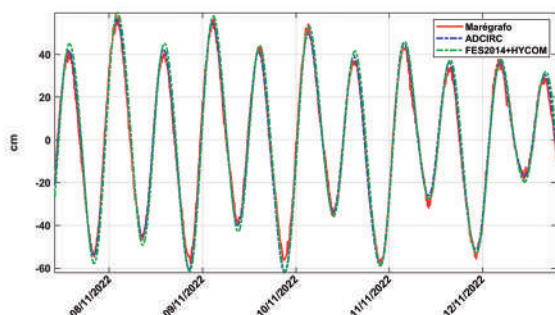


Figura 2 – Séries temporais de altura da superfície livre do mar (cm) obtidos pelo marégrafo do sistema IARA (vermelho), modelo ADCIRC (azul) e modelos FES2014+HYCOM (verde)

Considerando os resultados de corrente integrada na vertical modelada pelo ADCIRC, observa-se uma variação temporal com um sinal de corrente de maré bem marcante. A comparação desses resultados com os dados de circulação

medidos com ADCP pela comissão realizada pelo H-11, na face sul da Ilha dos Porcos, em frente a Arraial do Cabo, verifica-se que a componente v de velocidade foi mais bem modelada pelo ADCIRC (Figura 3). A frequência de oscilação semi-diurna observada nos dados coletados de circulação confirmam a presença da corrente de maré na região.

Para quantificar a contribuição da energia da corrente de maré em relação a energia total da circulação da região, foi realizada a análise harmônica das séries temporais das componentes u e v para a realização da previsão da corrente de maré. O cálculo isolado da variância da corrente de maré possibilita a comparação com a variância da corrente total em cada ponto de grade do domínio de simulação. A figura 4 mostra a distribuição espacial da relação entre a variância da corrente de maré e a variância da corrente total em porcentagem. Valores mais altos, próximos de 100%, evidenciam as regiões onde as correntes de maré são dominantes. Por outro lado, valores mais baixos sugerem que a circulação seja impulsionada por outros mecanismos, como forçantes atmosféricas e a variabilidade da corrente costeira *longshore*. Como exemplo, as figuras S1 e S2 mostram, respectivamente, as séries temporais de corrente total e de maré para um ponto do domínio onde a maré explica 53% (S1) e 90% (S2) da variância da corrente total.

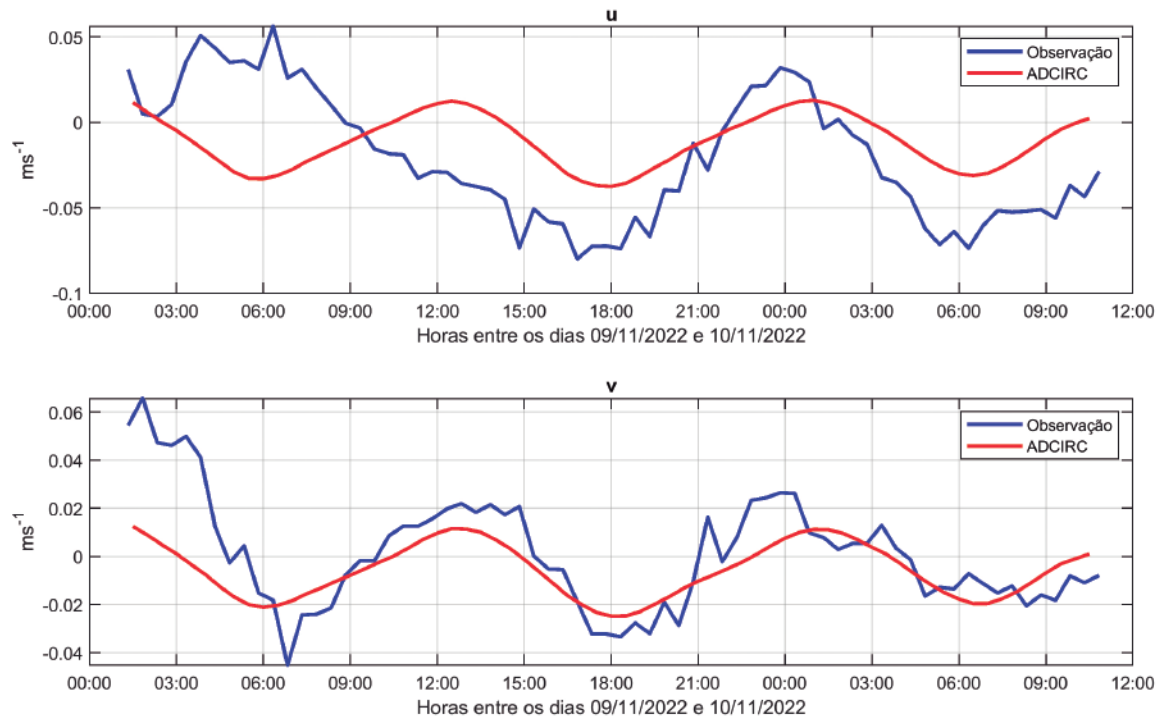


Figura 3 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v). Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho

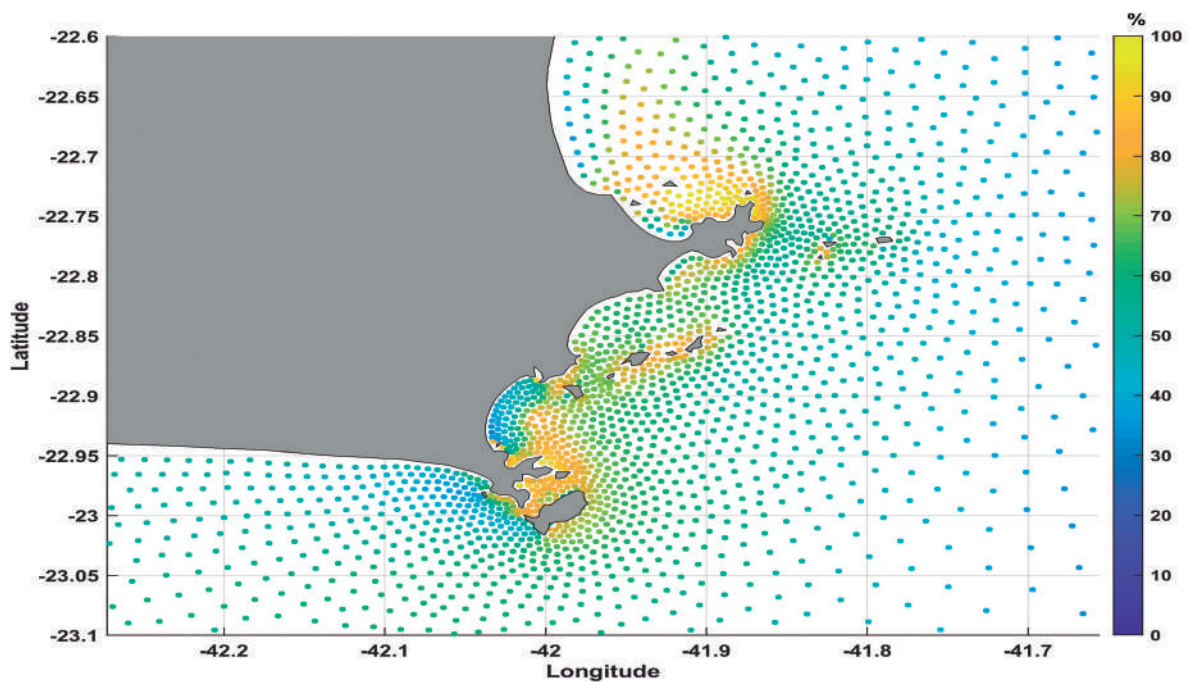


Figura 4 – Distribuição espacial da contribuição (%) da energia da corrente de maré na corrente total, calculada para cada ponto do domínio de simulação. Valores mais altos indicam as regiões onde as correntes de maré dominam a circulação



4. CONCLUSÕES

Para a primeira etapa da modelagem hidrodinâmica proposta pelo STFA, a modelagem 2D demonstra que a utilização de altura da superfície livre do mar do modelo de maré FES2014 somados aos resultados de nível do modelo HYCOM-NCODA como condição de contorno é uma estratégia válida e que pode ser utilizada sem a necessidade de grandes intervenções de calibração no modelo regional. O ADCIRC foi capaz de propagar o sinal do contorno para o interior do domínio de simulação, reproduzindo de maneira satisfatória

a circulação na região de estudo, bem como o efeito da maré na dinâmica oceanográfica da região.

O passo seguinte será realizar uma modelagem 3D, uma vez que um dos objetivos do STFA é fornecer informações oceanográficas na coluna d'água para o cálculo da velocidade do som e da circulação no oceano. Nesse sentido, mesmo sendo uma região costeira, Arraial do Cabo apresenta uma forte variação espaço-temporal da estratificação vertical da coluna d'água, o que configura a região como um excelente laboratório para os testes de modelagem numérica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLARD, P. *Anomalies dans les temperatures de l'eau de mer observees au Cabo Frio au Brésil. Bull. Inf. Com. Oceanogr. Etude Cotes*, 7(2), 1955, p.58-63.

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações - Estratégia Nacional De Ciência, Tecnologia E Inovação – 2016|2022. Brasília, 2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. Estratégia Nacional de Defesa. Brasília, 2013.

CALADO, L. *et al. Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22 s, Brazil). Continental Shelf Research*, 30(10-11), 2010, p.1181-1188.

CALIL ELIAS, L.M. Variabilidade interanual da ressurgência de Cabo Frio–RJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009

CAMPOS, E.J. *et al. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meanders. Geophysical Research Letters*, 27(6), 2000, p.751-754.

CASTELAO, R.M. & BARTH, J.A. *Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. Geophysical Research Letters*, 33(3), 2006.

CASTELAO, R.M. *et al. A modelling study of coastal upwelling driven by wind and meanders of the Brazil Current. Journal of Coastal Research*, 20(3), 2004, p.662-671.



CASTRO FILHO, B.M.D. *et al.* Estrutura termohalina e circulação na região entre Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS). O ambiente oceanográfico da plataforma continental e do talude na região Sudeste-Sul do Brasil. 2006.

COELHO-SOUZA, S.A. *et al.* Biophysical interactions in the Cabo Frio upwelling system, Southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, 60, 2012, p.353-365.

EMÍLSSON, I. *The shelf and coastal waters off southern Brazil. Boletim do Instituto Oceanográfico*, 11, 1961, p.101-112.

IKEDA, Y. *et al.* Observations on stages of upwelling in the region of Cabo Frio (Brazil) as conducted by continuous surface temperature and salinity measurements. *Boletim do Instituto Oceanográfico*, 23, 1974, p.33-46.

KÄMPF, J. & CHAPMAN, P. *The California current upwelling system. Upwelling systems of the world: A scientific journey to the most productive Marine ecosystems*, 2016, p.97-160.

LUETTICH, R.A. *et al.* ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries. Report 1, Theory and methodology of ADCIRC-2DD1 and ADCIRC-3DL. 1992.

MIRANDA, L. B. D. Forma da correlação TS de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião, *Boletim do Instituto Oceanográfico*, v. 33, n. 2, 1985, p. 105-119.

PALÓCZY, A. *et al.* Coastal upwelling off Cape São Tomé (22 S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes. *Continental Shelf Research*, 89, 2014, p.38-50.

PEREIRA, G.C. *et al.* Assessing the ecological status of plankton in Anjos Bay: a flow cytometry approach. *Biogeosciences Discussions*, 7(4), 2010, p.6243-6264.

PEREIRA, G.C. *et al.* Virioplankton abundance in trophic gradients of an upwelling field. *Brazilian Journal of Microbiology*, 40, 2009, p.857-865.

SIGNORINI, S.R. *On the circulation and the volume transport of the Brazil Current between the Cape of São Tomé and Guanabara Bay. Deep Sea Research*, 25(5), 1978, p.481-490.

STRAMMA, L. & PETERSON, R.G. *The South Atlantic Current. Journal of Physical Oceanography*, 20(6), 1990, p.846-859.



MATERIAL COMPLEMENTAR

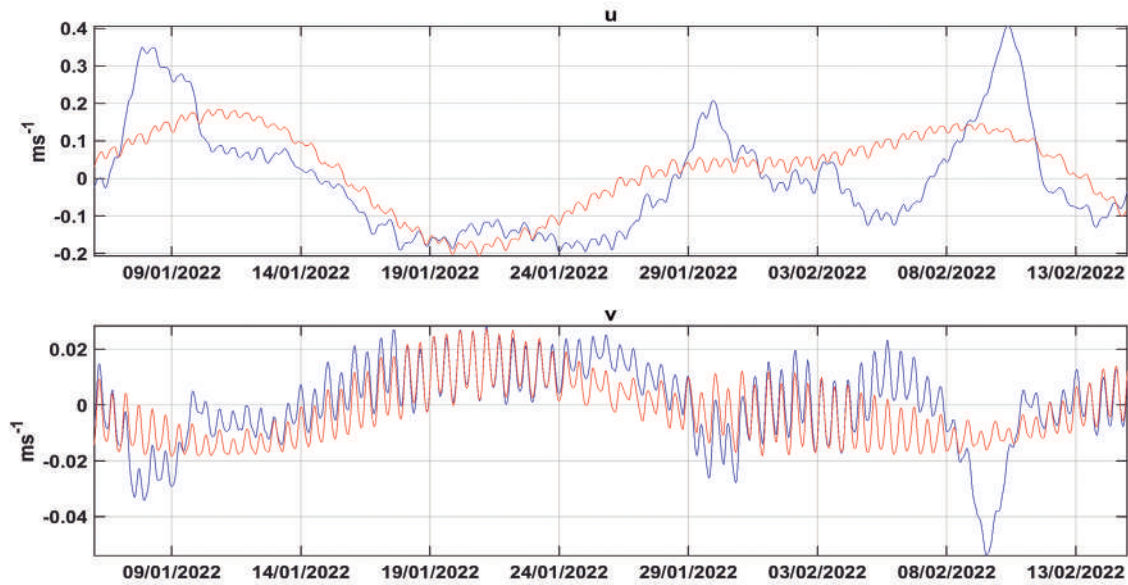


Figura S1 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v) para um ponto onde a maré explica 53% da variância da corrente total. Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho

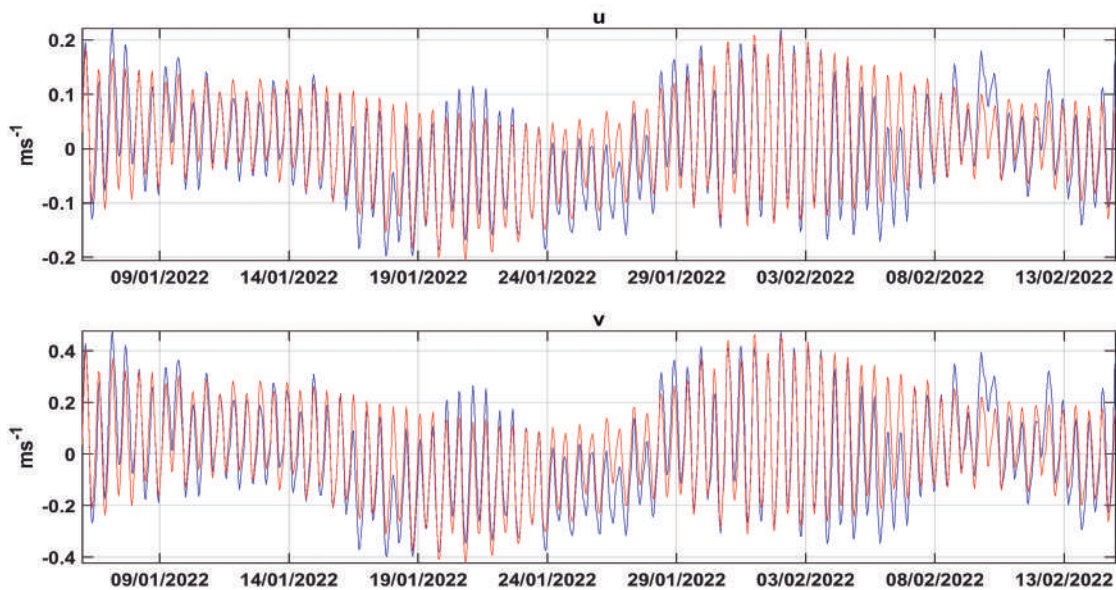


Figura S2 – Séries temporais de velocidade de corrente (cm/s) para as componentes zonal (u) e meridional (v) para um ponto onde a maré explica 90% da variância da corrente total. Dados medidos pelo Aviso de Pesquisa Hidroceanográfico Aspirante Moura, em azul, e resultados simulados pelo ADCIRC, em vermelho



POSICIONAMENTO COM CORREÇÃO EM TEMPO REAL OU PÓS-PROCESSADO: QUAL O MELHOR CUSTO-BENEFÍCIO PARA REDUÇÕES BATIMÉTRICAS GNSS?

Felipe Rodrigues Santana¹
Claudia Pereira Krueger
Érica Santos Matos Baluta
Elias de Castro Nadaf²

RESUMO

Uma das maiores fontes de incerteza vertical nos levantamentos batimétricos consiste no processo de redução de sondagem, pois a maré medida na costa não necessariamente será a mesma no local e instante onde se encontra a plataforma de sondagem. Uma das formas de reduzir consideravelmente tais incertezas consiste em utilizar a variação das altitudes elipsoidais da antena GNSS da lancha como representativa das oscilações do nível do mar e da atitude da embarcação. Tradicionalmente, a DHN utiliza para o posicionamento 3D (horizontal e vertical) de seus navios, um sistema de posicionamento com correção Global (GcDGNSS) pago, desenvolvido pela NASA, que utiliza o *software* RTG. Nesse artigo é feita a comparação desse método com outros pós-processados, tais como o PPP e o PPK, para um período de 12 horas, quando a lancha permaneceu atracada junto ao marégrafo do Clube Naval Charitas, na Baía de Guanabara. O RTG apresentou um RMS (95%) de 8,26

¹ Oficial do Corpo da Armada.

² Oficial do Corpo da Armada; M. Sc. em Meteorologia e Oceanografia Física pela *Naval Postgraduate School*, e encarregado da Divisão de Oceanografia Operacional do CHM.



cm, enquanto o PPP de 5 cm e o PPK de 3,3 cm. Dessa forma, nota-se que esses dois últimos métodos, além de serem gratuitos, possuem incertezas menores. Por fim, as vantagens e desvantagens desses métodos serão discutidos nesse artigo, a fim de subsidiar a decisão da DHN sobre a adequabilidade no emprego de recursos para contratação do serviço RTG. O uso de métodos pós-processados é útil para todas as áreas do posicionamento hidrográfico e oceanográfico.

Palavras-Chave: Hidrografia; maré; GNSS; posicionamento; incerteza.

ABSTRACT

One of the greatest sources of vertical inspiration in bathymetric surveys is the sounding reduction process, as the tide measured on the coast will not necessarily be the same at the place and time where the sounding platform is located. A way to considerably reduce such intermittence is to use the variation of the ellipsoidal height of the speedboat's GNSS antenna as a representative of the sea level oscillations and the attitude of the vessel. Traditionally, DHN uses a paid Global Positioning System (GcDGNSS) developed by NASA for the horizontal and vertical positioning of its ships, which uses the RTG software. This article compares this method with other post-processing methods, such as PPP and PPK, for a period of 12 hours when the boat is alongside next to the tide gauge at Clube Naval Charitas' wharf in Guanabara Bay. The RTG has shown

RMS (95%) of 8.26, while the PPP of 5 cm and the PPK of 3.3 cm; Therefore, it is clear that these last two methods, besides of being free, are more accurate. Finally, the pros and cons of those methods will be discussed in this article, in order to support DHN's decision whether it is worth continuing to expend financial resources for the RTG service. The use of post-processed methods is useful for all areas of hydrographic and oceanographic positioning.

Keywords: Hydrography; tide; GNSS; positioning; uncertainty.

1. INTRODUÇÃO

Em todo levantamento hidrográfico é necessário realizar a redução batimétrica, que consiste em descontar das profundidades medidas, as parcelas referentes à maré e aos movimentos de atitude da embarcação. Contudo, à medida que a lancha hidrográfica se afasta da estação maregráfica, a maré medida na costa não necessariamente será a mesma no local onde se encontra a embarcação, ocasionando erros, chamados de cotidais, que podem passar de 5m, dependendo da complexidade da área, como por exemplo, no Igarapé do Inferno (AP), onde a amplitude de maré pode passar a 10m (SILVA, 2015). Por outro lado, a Incerteza Vertical Máxima admitida em canais de navegação com 10m de profundidade para Levantamentos com Ordem Exclusiva, por exemplo, é de 17cm (OHI, 2020).

Uma solução para atingir esta precisão é utilizar a variação das altitudes

elipsoidais da embarcação, como representativas das oscilações de maré no local onde se encontra a plataforma de sondagem. Tradicionalmente, utiliza-se o termo maré-GNSS, mas na verdade com o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) é possível realizar a medição, não só da maré, mas também dos movimentos de *heave*, calado dinâmico e carregamento da embarcação (Figura 1). Dessa forma, também os esforços logísticos dos levantamentos hidrográficos são reduzidos consideravelmente, uma vez que reduz a necessidade de manutenção de estações maregráficas na costa tornando os levantamentos mais rápidos, baratos e com menor incerteza nos dados (ZIEBART *et al.* 2007; RAMOS, 2007; MILLS e DODD, 2014). Contudo, resta ainda o fato de que os dados de maré estão relacionados ao NR (nível de redução), e os dados do GNSS, ao elipsoide. Portanto, torna-se necessário desenvolver um

modelo de separação (SEP¹) entre essas duas superfícies, de modo que cada ponto de latitude e longitude desse modelo tenha um valor de separação e permita referenciar os dados de altitudes elipsoidais ao NR.

Assumindo o conhecimento do SEP, esse trabalho terá como foco os diferentes métodos de posicionamento GNSS para medição do nível do mar, dentre os quais pode-se citar aqueles com solução tanto em tempo real, como RTK (*Real Time Kinematic*) e GcDGNSS (*Global Correction Differential GNSS*) (ex: RTG – *Real Time Gipsy*), os quais foram analisados por Ramos e Krueger (2008), quanto aqueles com solução pós-processada, como o PPP (*Precise Point Positioning*) e o PPK (*Post-processed Kinematic*), que foram analisados por Krueger, Silva e Vieira (2012) para a redução de sondagem.

Em relação ao RTG, desde 2007 a DHN (*Diretoria de Hidrografia e*

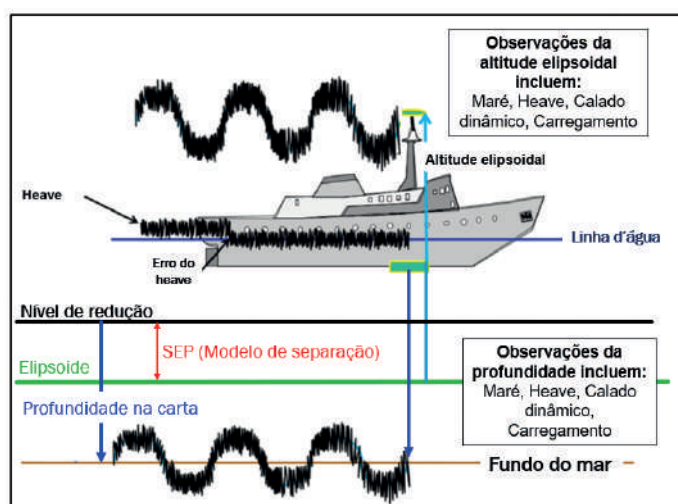


Figura 1 – esquema das componentes verticais envolvidas no levantamento hidrográfico. Fonte: Adaptada de Mills e Dodd (2014)

¹ Para uma revisão sobre várias formas de se determinar o SEP, pode-se consultar Santana *et. al* (2020)



Navegação) vem utilizando esse método para levantamentos hidrográficos em áreas *offshore*, que exigem ordem especial, porém, esse é um serviço pago, cuja licença é renovada anualmente para diversos navios hidrográficos no país. Porém, será que outros métodos de posicionamento, que são gratuitos, são capazes de proporcionar dados com menores incertezas e maior disponibilidade, isto é, sem perda de sinal tais como em ocasiões que a lancha de sondagem passa sob pontes e obstáculos? A resposta a essa pergunta será encontrada ao longo desse artigo.

Nesse sentido, o foco será dado para o posicionamento vertical, que tende a ter uma incerteza maior do que o horizontal, devido a um número menor de vetores para o ajustamento das observações, portanto, os resultados desse trabalho podem valer também para o posicionamento planimétrico da embarcação. Para o entendimento dessas questões, na próxima seção será descrita uma revisão sucinta sobre os principais métodos de posicionamento, seguidos dos materiais e a metodologia utilizada. Por fim, será realizada uma comparação entre os métodos de posicionamento em tempo real e pós-processado, assim como um resultado do GcDGNSS, em comparação com o PPK, quando a lancha passa sob uma ponte.

2. POSICIONAMENTOS GNSS

O conceito fundamental do posicionamento GNSS é baseado no tempo para realização de um trajeto unidirecional das ondas eletromagnéticas em diferentes frequências. Os receptores usam o conhecimento, a priori, do sinal gerado no satélite para duplicar o sinal internamente, e o tempo que o sinal leva para percorrer do satélite ao receptor é calculado pelo deslocamento de fase medido entre o sinal gerado no receptor e o recebido do satélite. Desprezando os erros de propagação, é possível calcular a distância entre o receptor e o satélite por meio do produto entre o tempo de viagem do sinal e a velocidade da luz. Como essa distância é afetada por diversos erros, tais como: falta de sincronismo entre os relógios do satélite e do receptor, propagação do sinal na troposfera e na ionosfera, variações no centro de fase da antena e multicaminho, essa distância é chamada de pseudodistância. Geometricamente, pode-se dizer que o ponto de interseção de três esferas de raio igual a pseudodistâncias para três satélites diferentes, fornece a posição do receptor (WELLS, 1987, WARDWELL, 2008).

Na próxima seção serão descritos alguns métodos para corrigir tais fontes de erros, tanto em tempo real, quanto no pós-processamento.

2.1. Posicionamento em tempo real

Enquanto os sensores de uma estação maregráfica podem medir o nível do mar com uma precisão milimétrica, as soluções fornecidas pelo receptor GNSS de uma lancha hidrográfica podem facilmente chegar a incertezas decimétricas devido aos diversos erros supracitados. Uma das formas de minimizá-los, pode ser utilizando o posicionamento da estação móvel através das correções diferenciais geradas em uma estação de referência enviadas em tempo real por meio de um sistema de comunicação (rádio de transmissão, linha telefônica ou satélites de comunicação). Estas correções devem estar em um formato apropriado, definido pela *Radio Technical Committee for Maritime Service (RTCM)* (KRUEGER, 1996; SEEBER, 2003). Quanto ao comprimento da linha de base, segundo NOAA (2019), para se atingir incertezas no nível centimétrico, é recomendado utilizar uma máxima distância de 40 km entre a estação de referência ou base e a embarcação, dessa forma, aumenta a probabilidade dessa estação móvel estar sob a mesma influência atmosférica da estação base. A transmissão desses dados pode ser via rádio, porém, sua precisão está condicionada à distância entre a base e a estação móvel, bem como à existência de alguma obstrução no

trajeto do sinal. Uma forma de minimizar as incertezas dessa comunicação é realizar a transmissão via NTRIP (*Networked Transport of RTCM² via Internet Protocol*). Segundo Costa *et al.* (2008), no Brasil, essa modalidade de transmissão de dados foi iniciada em 2008 pelo IBGE através do serviço chamado de RBMC-IP.

Além de sistemas com correções locais, existem também aqueles que oferecem uma correção a nível global. Essa técnica é chamada tanto de GcGPS (*Global Corrected GPS*), por Mann (2007), quanto de GDGPS (*Global Differential GPS*), por Arroyo-Suarez *et al.*, (2005), para este estudo será adotado o termo GcDGNSS. Nessa abordagem, uma rede global de estações de referência calcula os parâmetros e as fontes de erros dos satélites GNSS e enviam, via internet, para um centro de análise, o qual retransmite ao usuário, em tempo real, via satélite ou via internet, as correções de órbita do relógio. Ramos (2007) avaliou a performance do equipamento C-Nav/StarFire (*C/C Technologies, INC*), que emprega o algoritmo RTG (*Real Time Gipsy*), desenvolvido pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), com precisão nominal planimétrica de 10 cm independentemente da localização; contudo, destaca-se que esse é somente um dentre tantos outros serviços e sistemas existentes, os quais podem ser observados no Quadro 1, apresentado na sequência³.

² *Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM)*

³ Mais detalhes podem ser encontrados em FIG (2019) e no manual de cada equipamento.



Quadro 1 – exemplos de sistemas de correção global em tempo real NOTA: Foram utilizadas as seguintes legendas na coluna GNSS: G - GPS, R - GLONASS, E - Galileo, C - BeiDou, J - QZSS. O suporte real das constelações GNSS pode depender da região. FONTE: Adaptado de FIG (2019)

Empresa	Serviço	Acurácia (hor. 95%), cm	Tempo de convergência (min)	GNSS	Comentário
Trimble	CenterPoint RTX Fast	< 2,5	<5	G,R,E,C,J	
	CenterPoint RTX Standard	< 2,5	<15	G,R,E,C,J	
	FieldPoint RTX	< 20	<15	G,R,E,C,J	
	RangePoint RTX	< 50	< 5	G,R,E,C,J	
	ViewPoint RTX	< 100	< 5	G,R,E,C,J	
Trimble (serviço fornecido pela Fugro)	OmniSTAR HP	< 10	< 45	G	
	OmniSTAR G2	< 10	< 20	G, R	
	OmniSTAR XP	< 10	< 45	G	
	OmniSTAR VBS	< 100	< 1	G	Correções de pseudodistância
Fugro	Starfix.G2+	< 3	s/ informação		Utiliza resolução de ambiguidade
	Starfix.G4	< 10	s/ informação	G,R	
	Starfix.G2	< 10	s/ informação	G,R,E,C	
	Starfix.XP2	< 10	s/ informação	G,R	Correção tercerizada
	Starfix.HP	< 10	s/ informação	G	
	Starfix.L1	< 100	s/ informação	G	Correções de código em uma frequência
NavCom	StarFire SF2	< 10	30 – 45	G, R	
	StarFire SF3	< 3	30	G, R	
C-Nav	C-Nav ²	< 10	s/informação	G, R	Algoritmo StarFire
	C-Nav ¹	< 3	s/informação	G	Algoritmo StarFire
Veripos	Apex 5	< 5	s/informação	G,R,E,C,J	Rede de estação de referência própria e sua modelagem matemática
	Apex 2	< 5	s/informação	G,R	
	Apex	< 5	s/informação	G	
	Ultra 2	< 10	s/informação	GR	Rede de estação de referência JPL e sua modelagem matemática
TerraStar (Hexagon)	TerraStar-C PRO	< 3	< 18	G,R,E,C	Resolução fixa das ambiguidades
	TerraStar-C	< 5	30 – 45	G,R	
	TerraStar-L	< 50	< 5	G,R	Correção de pseudodistância
Leica Geosystems (Hexagon)	Leica SmartLink	< 3	30	s/informação	Correções TerraStar
Hemisphere	AtlasBasic	< 50	Instantâneas	G,R,C	
	Atlas H100	< 100	1 – 2	G,R,C	
	Atlas H30	< 30	1 – 5	G,R,C	
	Atlas H10	< 8	10 – 40	G,R,C	

2.2. Posicionamento pós-processado

Apesar da alta precisão possível de se obter com os sistemas de posicionamento em tempo real com correção global, todos eles são pagos, o que pode ser um fator limitante para muitos usuários. Assim, outra abordagem possível é realizar o posicionamento pós-processado, que pode ser relativo ou Por Ponto Preciso (PPP). O levantamento PPP foi estudado de forma pioneira por Zumberg *et al.* (1997), o qual, primeiramente, determinou as posições precisas dos satélites GPS e as correções dos relógios obtidas por uma rede de receptores GNSS distribuídos globalmente; em seguida, analisou os dados de uma rede local, estimando parâmetros específicos do receptor a partir das suas informações, e manteve os parâmetros dos satélites fixos em seus valores determinados na solução global.

Posto isso, observa-se que essa técnica possui a grande vantagem de não estar limitada à linha de base, contudo, é necessária a realização de mais correções relacionadas ao satélite, ao receptor, bem como à utilização de modelos atmosféricos e geofísicos (MONICO, 2008). Ademais, ressalta-se que, para serem atingidas acurácias centimétricas, é necessário utilizar um receptor de dupla-frequência e as

medições da fase da onda portadora (AB-DALLAH, 2016). As correções em questão podem ser feitas por meio dos produtos operacionais fornecidos por diversos centros de análise no mundo, tais como IGS, que inclui efemérides precisas dos satélites GNSS; cálculo das posições e das velocidades de estações na rede GNSS global; EOPs (movimento polar e taxas, duração do dia); e soluções de estação e relógio dos satélites, além de outros produtos derivados dos acervos de dados GNSS do CDDIS, que incluem estimativas do atraso zenital total (ZTD- *Zenith Total Delay*) (componentes secos e úmidos) e mapas globais da ionosfera.

No Quadro 2, observam-se algumas descrições das efemérides disponibilizadas pelo IGS. Nota-se que, na comparação entre a efeméride rápida e final, não existe nenhuma diferença significativa em termos de acurácia⁴.

Quadro 2 – descrição da acurácia, latência, atualização e taxa de intervalo das efemérides do igs. Fonte: adaptado de igs (2021)

Tipo		Acurácia	Latência	Atualização	Taxa de intervalo
Transmitida (Broadcast)	Órbitas	~100 cm	Tempo real	—	diário
	Relógio dos satélites	~5 ns RMS ~2.5 ns SDev			
Ultra-Rápida (metade prevista)	Órbitas	~5 cm	Tempo real	em 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógio dos satélites	~3 ns RMS ~1.5 ns SDev			
Ultra-Rápida (metade observada)	Órbitas	~3 cm	3 – 9 horas	em 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Relógio dos satélites	~150 ps RMS ~50 ps SDev			
Rápida	Órbitas	~2.5 cm	17 – 41 horas	em 17 UTC diariamente	15 min
	Relógio dos satélites e da estação	~75 ps RMS ~25 ps SDev			5 min
Final	Órbitas	~2.5 cm	12 – 18 dias	Toda quinta	15 min
	Relógio dos satélites e da estação	~75 ps RMS			Sat.: 30 s
		~20 ps SDev			Est.: 5 min

⁴ Mais detalhes sobre outros produtos podem ser consultados em CDDIS (2021).



Segundo NOAA (2019), as efemérides devem ser de qualidade adequada para obter o nível desejado de precisão da componente de controle vertical do GPS/GNSS. Para processamento PPK, que utilizam a fase da portadora, todos os produtos do IGS podem ser suficientes: transmitida, ultrarrápida, rápida e final, sendo recomendado utilizar as melhores órbitas e relógios disponíveis no momento destes processamentos. Nos métodos PPP, as efemérides ultrarrápidas, ou melhores, podem ser suficientes e não é aconselhável utilizar produtos de diferentes centros de análises. Assim, de posse de tais correções, o processamento PPP pode ser realizado por meio de diversos *softwares*, sendo alguns listados no Quadro 3:

Quadro 3 – pacotes de *softwares* disponíveis para processamento ppp. Fonte: adaptado de Abdallah (2016)

Software	Provedor
Bernesse GNSS	Instituto Astronômico da Universidade de Berna (AIUB), Suíça
GIPSY-OASIS II	JPL (Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology), EUA
RTKLIB	Takasu na Tokyo University Marine Science e Tomoja Technology, Japão
TerraPos	TerraTec e o Serviço Hidrográfico Norueguês, Noruega
GPSTk	Laboratório de Geofísica e Espaço dentro dos Laboratórios de Pesquisa Aplicada da Universidade do Texas em Austin

Existem ainda serviços on-line que realizam o processamento de forma gratuita, nos quais basta inserir os dados coletados no formato Rinex e as informações da antena empregada. Entretanto, nesses serviços, o usuário não pode escolher o tipo de correção ou de modelo a ser utilizado, uma vez que os dados são processados com a configuração padrão do serviço. Na Tabela 1, é apresentada uma análise, elaborada por Maciuk e Skroupa (2017), dos

resultados obtidos com os processamentos PPP no modo cinemático utilizando diferentes serviços.

Tabela 1 – desvios médios absolutos das coordenadas obtidas com as componentes horizontais (n e e) e verticais (u) e seus respectivos desvios padrões. FONTE: Adaptada de FIG 57 (2019).NOTA: CSRS (*Canadian Spatial Reference System*), APPS (*Automatic Precise Positioning Service*), GAPS (*GPS Analysis and Positioning Software*)

Dia (DOY)	Serviço	N(cm)		E (cm)		U (cm)	
261	CSRS	1,6	2,0	1,6	2,0	3,3	3,6
	APPS	0,7	1,0	0,7	0,9	1,6	2,2
	GAPS	13,1	6,2	7,8	4,3	13,3	9,5
	magic-GNSS	1,8	2,2	1,5	2,4	0,9	1,3
268	CSRS	1,5	1,5	0,8	0,9	2,3	2,4
	APPS	0,7	1,0	0,7	0,9	1,7	2,1
	GAPS	9,4	2,1	7,1	1,9	13,0	3,8
	magic-GNSS	1,3	1,7	1,1	1,7	1,3	1,5

No Brasil, o IBGE disponibiliza o Serviço IBGE-PPP, de forma on-line e gratuita, que utiliza o programa CSRS-PPP, desenvolvido pelo NRCAN (*Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada*). Esse serviço permite aos usuários obterem coordenadas referenciadas ao Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS2000) e ao ITRF, utilizando receptores GPS e GLONASS. Nos cálculos, são empregados produtos disponibilizados pelo IGS, tais como: órbitas precisas, correções aos relógios dos satélites, modelos e mapas globais de ionosfera e modelos de correção do centro de fase das antenas⁵.

Cabe destacar também os diferentes tamanhos de arquivo que cada serviço exige para o *upload*. Por exemplo, o IBGE permite o envio de dados de no máximo 30 mb, o que pode ser uma limitação, pois usualmente um arquivo de GNSS

⁵Mais informações podem ser consultadas no manual do serviço, disponível em IBGE (2021)

coletado durante 24 h, a uma taxa de 1s, pode gerar arquivos Rinex de mais de 200 mb, o que tornaria necessário a edição do Rinex, utilizando *softwares* como o GFZ. Uma alternativa de serviço poderia ser o NRCAN, que aceita arquivos de até 300 mb e apresenta resultados compatíveis com o do IBGE em uma escala centimétrica.

Além do PPP, de acordo com Monico (2008), uma forma mais simples de realizar essas correções e que elimina a maioria dos erros citados é empregar uma ou mais estações base, com coordenadas conhecidas, as quais permanecem rastreando durante todo o levantamento. Assim, é possível calcular os vetores formados entre as estações base e móvel, de

forma a determinar as coordenadas, por meio da simples, dupla ou tripla diferença de fase. No Brasil, Fortes (1993) chama essa abordagem de Método de Posicionamento Relativo Cinemático (MPRC), enquanto, mais recentemente, alguns autores internacionais, como Mann (2010), denominam de Pós-processamento Cinemático (PPK – *Pos-processed Kinematic*)⁶.

No Quadro 4 é possível visualizar as diferenças entre as correções que devem ser feitas utilizando PPP em comparação com o DGNSS. Aqui, cabe destacar que os autores atribuem o método DGNSS a toda correção diferencial aplicada para os métodos PPK e RTK⁷, com linhas de base curtas.

Quadro 4 – erros que precisam ser corrigidos, ou levados em consideração para um ppp em relação ao DGNSS relativo. Fonte: adaptada de Rizos et al. (2012) e Abdallah (2016)

Tipo de correção	PPP	DGNSS
Erros dependentes dos satélites		
Correções precisas do relógio do satélite	Sim	Não
Desvio do centro de fase da antena do satélite	Sim	Não
Variações do centro de fase da antena do satélite	Sim	Sim/ Não
Erro de <i>phase wind-up</i> da antena do satélite	Sim	Não
Erros específicos do receptor		
Offset do centro da fase da antena do receptor	Sim	Sim
Variações do centro de fase da antena receptor	Sim	Sim
Erro de <i>phase wind-up</i> da antena do receptor	Sim	Não
Modelos Geofísicos		
Deslocamentos de maré terrestre sólida	Sim	Não
Carga da maré oceânica	Sim	Não
Carga da maré atmosférica	Sim	Não
Maré polar	Sim	Não
Movimento da placa tectônica	Sim	Não
Modelos atmosféricos		
Atraso troposférico	Sim	Sim
Atraso ionosférico	Sim (somente para L1)	Não

⁶Mais detalhes sobre os fundamentos desse método podem ser encontrados em Seeber (2003), Leick *et al.* (2004) e Monico (2008)

⁷Para mais detalhes sobre tais erros, podem ser consultados Seeber (2003), Hofmann-Wellenhof (2003), Leick (2004), Monico (2008), Rizos *et al.* (2012), Abdallah (2016) e Euriques (2018)



3. ÁREA DE ESTUDO

O local escolhido para a realização desse trabalho foi a Baía de Guanabara, onde lancha permaneceu atracada durante 4 dias no Clube Naval Charitas e em

Em relação aos dados coletados pelo GNSS, foi utilizado o sistema Seapath-130 da empresa Kongsberg, que combina receptores dupla-frequência GNSS, tecnologia inercial e algoritmos durante o processamento (KONGSBERG, 2013).

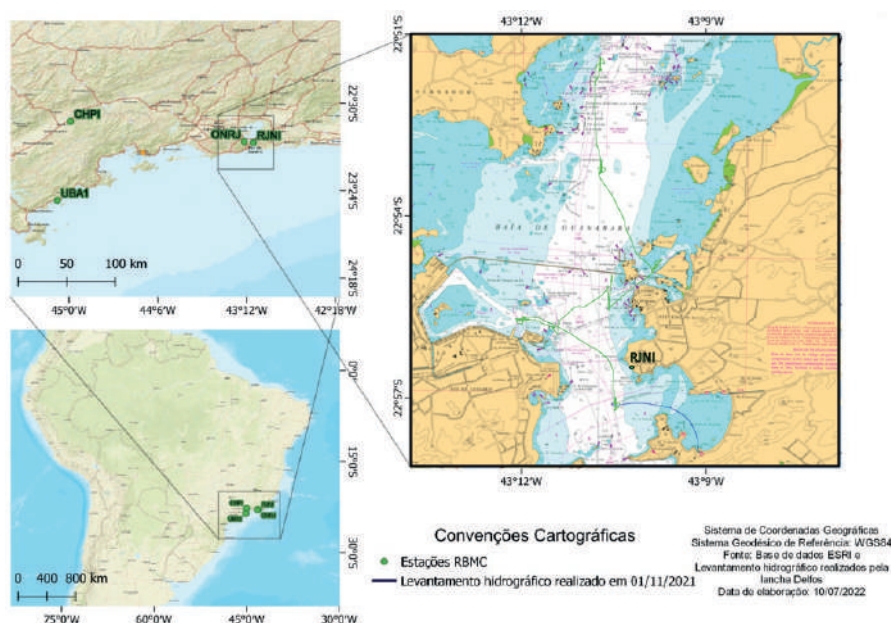


Figura 2 – Área de estudo. Fonte: Santana (2022)

outro dia realizou um trajeto passado sob a ponte Rio-Niterói, como pode ser observado na Figura 2. Além disso, observa-se também a localização da estação base RJNI, que está cerca de 4 km do Clube Naval Charitas.

4. MATERIAIS

Para a medição do nível do mar, foi instalado no Clube Naval Charitas um sensor de pressão Rugged Trolwl 100, com taxa de aquisição de 1 minuto, do dia 10 a 14 de maio, com as medidas do marégrafo calibradas de acordo com a régua da estação maregráfica descrita na ficha F-41 50180 do Clube.

Todos os demais sensores foram cedidos pela empresa Delfos Marítima, juntamente com a lancha Delfos (Figura 3), a qual possui uma haste lateral retrátil, onde são instalados o transdutor, o posicionador e o sensor inercial.



Figura 3 – lancha hidrográfica “Delfos” atracada próximo ao marégrafo de Charitas. Fonte: Kongsberg (2021)

Quadro 5 – Equipamentos utilizados e suas finalidades Fonte: Os Autores (2023)

Equipamento	Finalidade
Receptor Stonex Multiconstelação (GPS, GLONASS, BEIDOU, GALILEO, SBAS e IRNSS)	RTK-NTRIP
Receptor 3710 DGNSS	GcGNSS (Serviço Seastar G2 da Fugro), PPP e PPK
Receptor Novatel-DL V3	Estação Base (DHN) taxa 1Hz
MRU 5	Atitude da embarcação (Roll, Pitch, Heave)
Sistema Seapath-130	Atitude da embarcação (Yaw)

No Quadro 5 pode-se observar o tipo de equipamento utilizado e a finalidade.

O sistema de posicionamento principal utiliza o receptor 3710 DGNSS, capaz de receber continuamente as correções globais do serviço de posicionamento DGNSS da Fugro para as constelações GPS e GLONASS. O sinal de correção é decodificado, verificado e compilado em duas estações de controle centrais (*Networks Control Centers*), Houston e Perth, e, então, enviados, por meio de *uplink*, por dois satélites geoestacionários. O serviço Seastar G2 utiliza as frequências GPS L1 e L2 para compensar o atraso ionosférico. Os valores de correção de órbitas e relógio são calculados a partir de estações de referência em todo o globo, com uma acurácia maior do que as efemérides transmitidas. Assim, as correções são transmitidas para todo o mundo e a distância da estação mais próxima não afeta a performance (KONGSBERG, 2013).

Quanto à atitude da embarcação, no Quadro 6, observa-se a acurácia dos dados coletados pelo Sistema Seapath-130, bem como da medição dos *offsets*, oriundos de fábrica:

Quadro 6 – acurácia do sistema Seapath. Fonte: Kongsberg (2013)

Tipo de dado	Acurácia
<i>Roll</i>	0,008°
<i>Pitch</i>	0,008°
Heave (em tempo real)	5 cm
<i>Delayed-heave</i> (sinal atrasado)	4 cm
Serviço Fugro G2	10 cm RMS
Acurácia horizontal dos offsets dos sensores	2 cm
Acurácia vertical dos offsets dos sensores	5 mm

Na Figura 4, à esquerda do sistema Seapath-130, observa-se o local de instalação do receptor STONEX para a solução RTK.



Figura 4 – localização do receptor Stonex e do sistema Seapath-130. Fonte: Santana (2022)



5. PROCESSAMENTO DE DADOS

Além de se utilizar o serviço online PPP-IBGE, para o pós-processamento relativo com o método PPK, foi utilizado o *software* gratuito RTKLIB, desenvolvido na *Tokyo University of Marine Science and Technology*, por Takasu (2009). Como a linha de base tem um comprimento curto, de 4 km, não foram necessários aplicar modelos de correção ionosférica e troposférica. Em relação aos dados, este *software* não é compatível com o formato RTCM, exportado pelo Seapath, dessa forma, foi necessário utilizar também o *software* Rinexconv, da Kongsberg a fim de realizar a conversão para Rinex. Para o processamento PPP do IBGE, além da conversão de RTCM para Rinex, foi necessária ainda a conversão de Rinex 3.0 para Rinex 2.0, pois o PPP-IBGE reconhece somente este último formato. Para isso foi utilizado o *software* GFZRNx, desenvolvido pelo *GFZ German Research Centre for Geosciences* GFZ (2016).

Uma vez realizado o processamento de todos os dados GNSS, o tratamento das séries temporais foi efetuado em três estágios:

1) Identificação e remoção de *outliers*, aplicando um filtro de Box-Plot que remove os dados que são maiores do que 3 sigmas e substitui por NaN, como pode ser observado na figura 5.

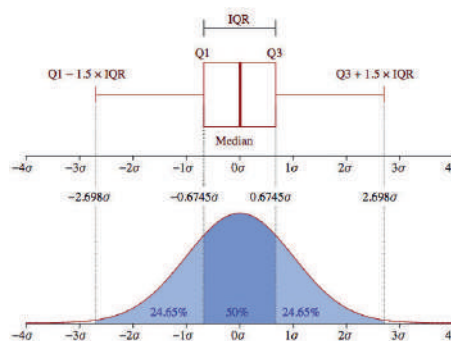


Figura 5 – Filtro de Boxplot, com os valores de seus quartis (Q1 e Q3), multiplicados por 1,5, de modo a se aproximar do valor de 3 sigma, que corresponde ao intervalo de confiança de 99%. Fonte: Zheng (2021)

2) Aplicação de um filtro de média móvel com o tamanho da janela que mais se adequa aos dados de maré;

3) Como pode ocorrer gaps na solução GNSS, foi utilizada a função *posixtime* do MatLab para selecionar os dados do GNSS mais próximos do instante de coleta dos dados de maré. Por exemplo, um dado de maré é coletado no instante 13h05min, e houve um gap na solução GNSS de 13h04min a 13h09min. O algoritmo irá selecionar o dado GNSS de 13h03min.

Após a filtragem dos dados, a avaliação foi feita em termos de RMS, calculado pela equação 1:

$$RMS_U^{1D} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{Ref} - U_{Metodo_x})_i^2}{n}} \quad (1)$$

Onde:

- U_{Ref} : a coordenada vertical da solução de referência, e U_{Metodo} , a coordenada vertical do método a ser analisado;
- RMS_U^{1D} : a incerteza vertical 1D total do erro de posição Vertical.

6. RESULTADOS

Na Figura 6, observa-se todos os dados coletados pela lancha hidrográfico do dia 10/05 a 14/05. No período do dia 10 ao dia 12 a lancha permaneceu atracada ao lado da estação maregráfica do Clube Naval Charitas. Na primeira parte do dia 12, o sensor foi desligado (observa-se o gap de dados) e na segunda parte desse dia a lancha percorreu uma trajetória na Baía de Guanabara.

Por fim, do final do dia 12 ao dia 14, a lancha permaneceu atracada no Clube Naval Charitas.

A fim de avaliar os dados do GNSS em relação ao marégrafo, foi selecionado o período contínuo dos dados de 10 a 12 de maio. Para realizar essa comparação, as curvas foram subtraídas de suas respectivas médias. Na Figuras 7 observa-se os resultados em relação ao PPK e ao PPP.

Para analisar os dados em tempo real, em comparação com aqueles obtidos no pós-processamento, foi selecionado um período de aproximadamente 12 horas entre os dias 11 e 12, quando foram coletados os dados do RTK e Gc-DGNSS. O quadro 7 apresenta os valores de RMSE (95%), em relação aos valores da estação maregráfica.

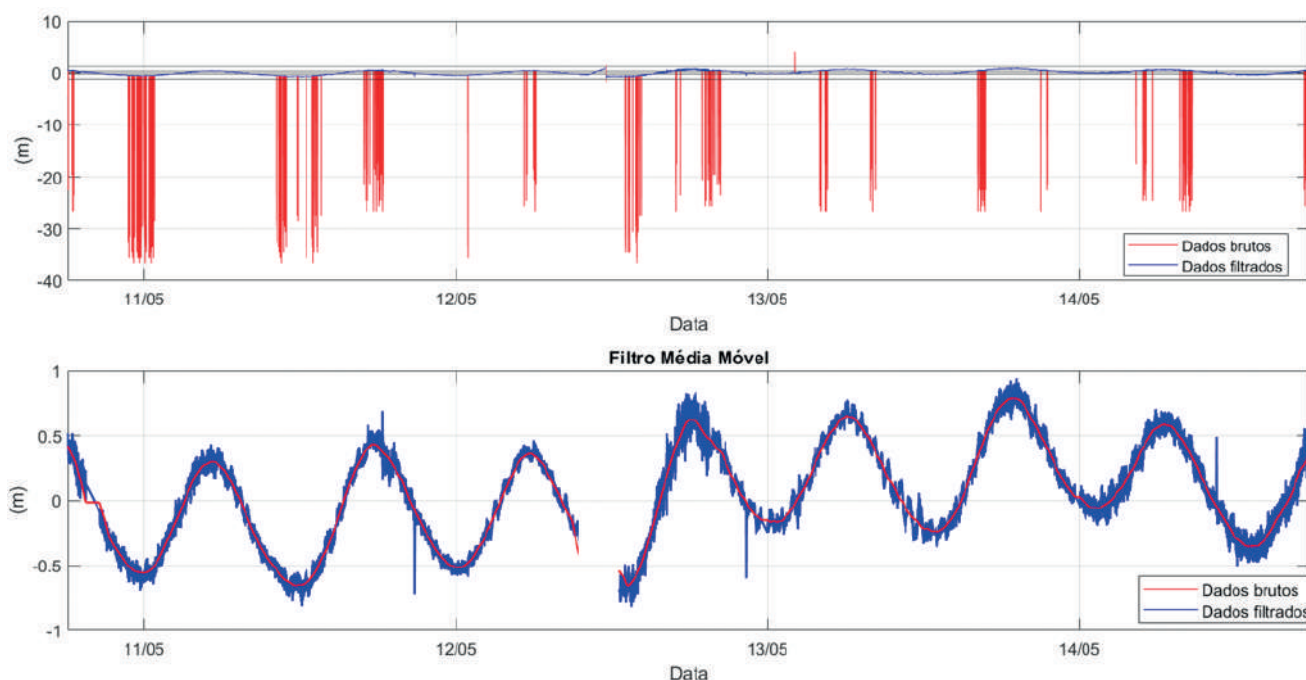


Figura 6 – Filtro de dados *boxplot* 1s e de média móvel do dia 10/05/2021 a 14/05/2021. Fonte: autores (2023)

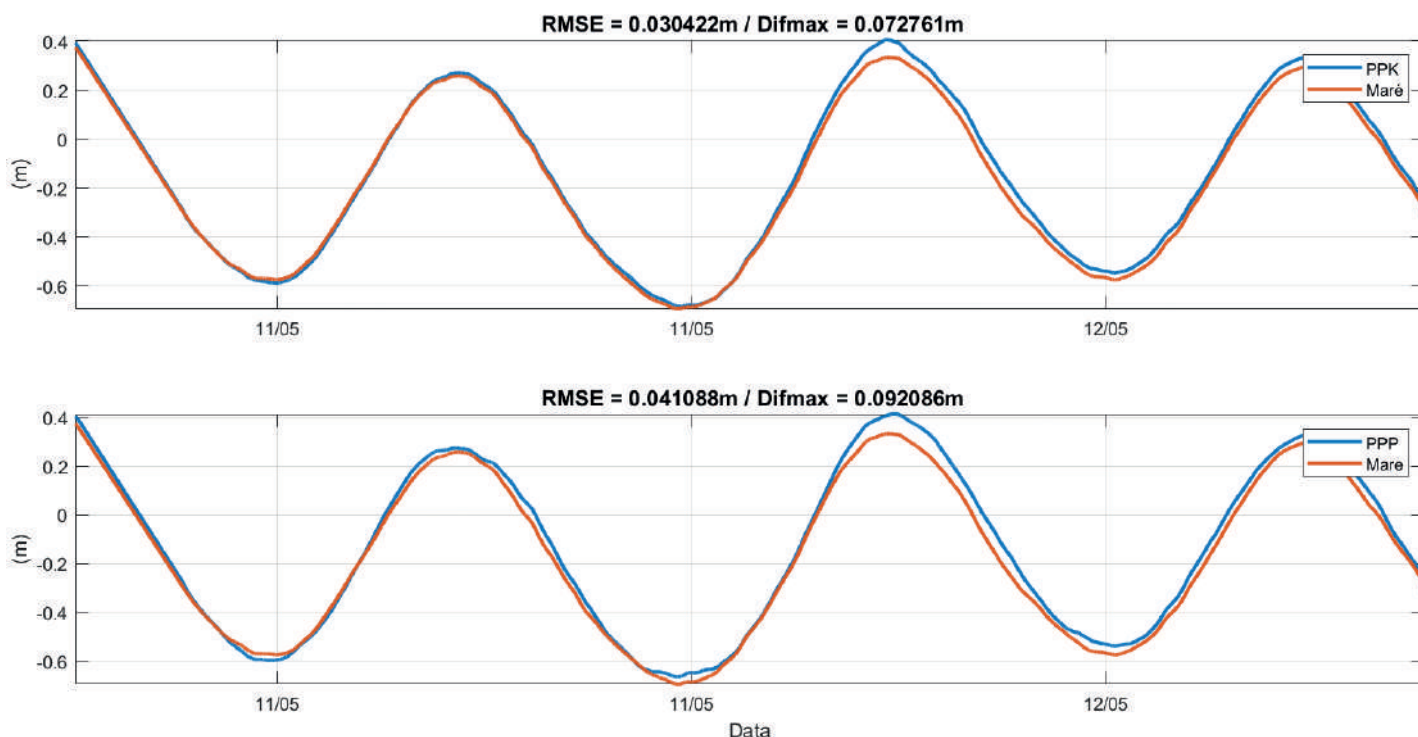


Figura 7 – Comparação entre a maré e o GNSS do dia 10/05/2021 a 12/05/2021. No gráfico de cima encontra-se a solução PPK e no de baixo a solução PPP. FONTE: Os Autores (2023)

Quadro 7 – Resultados (cm) dos métodos de processamento em relação ao marégrafo. Fonte: autores (2023)

	PPK	PPP	RTK	GcDGNSS
RMSE (95%)	0,0338	0,0506	0,0682	0,0826
Diferença máxima	3,9	4,8	10,6	13,9

Além disso, o resultado do método GcDGNSS também foi avaliado no instante em que a lancha passou sob a ponte Rio-Niterói, como pode ser observado na Figura 8, assim como a comparação entre os dados de altitudes elipsoidais do PPK e do GcDGNSS. Na Figura 9, apresenta-se uma análise estatística dos

dados filtrados do PPK e do GcDGNSS, subtraídos de suas respectivas médias, nota-se que a maioria das diferenças foi inferior a 5 cm, com um valor máximo superior a 20 cm no instante em que a lancha passou sob a ponte, além disso, observa-se ainda uma alta correlação entre as séries, no valor de 98,9 %.

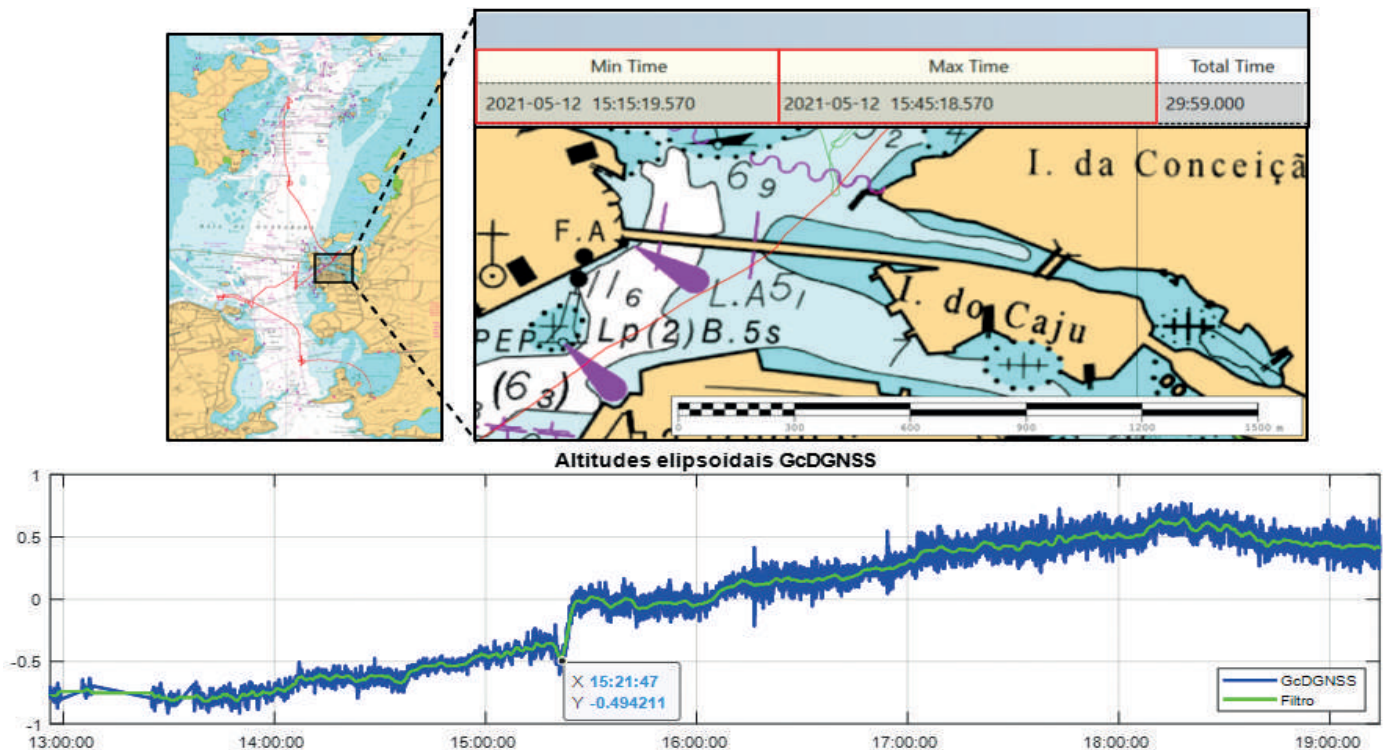


Figura 8 – comparação entre o GcDGNSS e PPK. FONTE: Os Autores (2023)

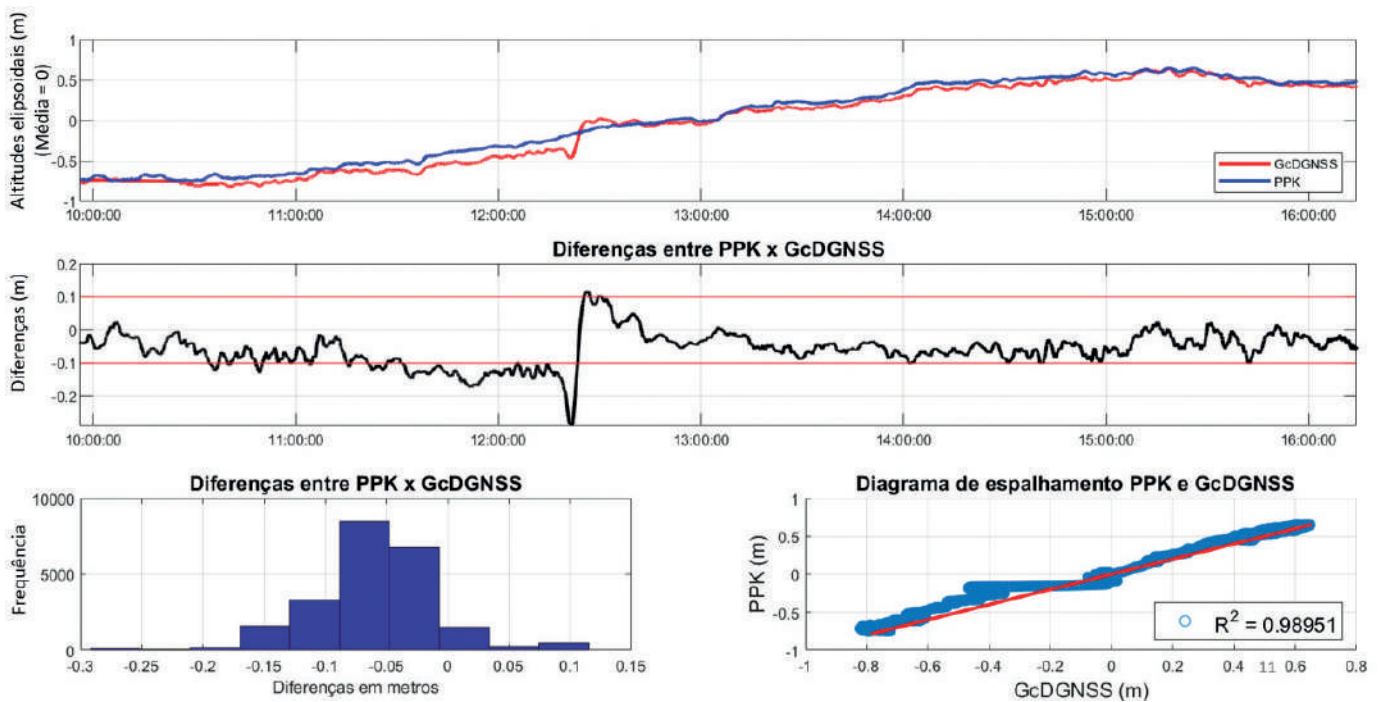


Figura 9. Fonte: os autores (2023)



7. DISCUSSÃO

A importância de aplicar um método para retirada de *outliers*, antes de realizar a suavização da curva pode ser visto na Figura 6, pois caso os dados espúrios não tivessem sido retirados com o filtro de *boxplot*, os mesmos poderiam contaminar o resultado final da média móvel. Na comparação com os dados da estação maregráfica do dia 10 ao dia 12 percebe-se que os métodos pós-processados (PPP e PPK) tiveram suas incertezas inferiores a 5 cm. Nesse contexto, para a publicação S-44 não existe um limite de incerteza a ser adotado para a medição do nível do mar de acordo com as ordens de Levantamento, porém o Serviço Hidrográfico Canadense, recomenda que nas Ordens Especial e Exclusiva, o nível do mar seja medido com uma incerteza abaixo de 5 cm. Tal valor foi demonstrado, para os períodos analisados, que os métodos pós-processados seriam capazes de atingir.

Por outro lado, os métodos baseados no posicionamento em tempo real (RTK e GcDGNSS) tiveram suas incertezas acima de 5 cm, como pode ser observado no quadro 7. Segundo, Mills e Dodd (2014), o controle vertical pós-processado tem uma qualidade melhor, pois permite o processamento empregando o filtro *forward-backward*, que reduz a incerteza na solução de altitude, enquanto outros métodos, por exemplo, os baseados em tempo real, efetuam somente o processamento com o filtro *forward*, o que conduz a preferência do método PPK em relação ao RTK, bem como do método PPP pós-processado em relação ao GcGNSS

(baseado no PPP). Tal fato, traz uma grande versatilidade para os métodos de posicionamento, pois o PPP, assim como os métodos do tipo GcDGNSS, não exigem uma estação base para processamento, sendo ideal para levantamentos *offshore*, e a ainda possui a maior vantagem por ser um serviço gratuito, diferente do GcDGNSS, para o qual a DHN renova anualmente a licença para seus Navios.

É verdade que os métodos em tempo real facilitam o monitoramento do posicionamento da embarcação durante sondagem, e pode ser muito útil para determinadas atividades marítimas como dragagem e monitoramento da folga dinâmica abaixo da quilha de navios mercantes. Porém, como em todo levantamento hidrográfico, os dados de batimetria passam, necessariamente, por uma etapa de pós-processamento, quando, por exemplo, é possível analisar se a velocidade do som foi inserida de maneira correta. Tal prática também poderia ser adotada para os dados de posicionamento, pois, como pode ser observado na Figura 8 e Figura 9, apesar da alta correlação (99%) dos dados de GcDGNSS em relação ao PPK, podem existir trechos nos quais o processamento em tempo real não apresente total disponibilidade e confiabilidade.

Existe também uma desvantagem dos métodos de posicionamento pós-processados, pois as linhas de sondagem são visualizadas em tempo real utilizando um método de posicionamento sem correção, chamado absoluto, que pode ter incertezas da ordem de metros. De outra forma, para os métodos com correção global em

tempo real, as linhas são visualizadas com precisões decimétricas. Porém, a incerteza do método absoluto pode ser corrigida no pós-processamento, pois tanto para o monofeixe, quanto para o multifeixe, o *software Caris Hips and Sips* permite utilizar a ferramenta *Import Generic Data Parser*, que viabiliza a importação de dados de arquivos .txt como a solução GNSS pós-processada. Contudo, também exige uma licença paga, mas se a Instituição já possui esse acesso, não haverá um custo adicional.

Portanto, a pergunta final que poderia ser debatida pela comunidade hidrográfica é: até que ponto vale a pena a DHN manter todas as licenças do serviço do posicionamento em tempo real, enquanto os métodos de pós-processamento são gratuitos, com melhor qualidade e ainda viabilizam as reduções batimétricas GNSS com os requisitos exigidos para as Ordens Especial e Exclusiva?

8. CONCLUSÃO

Uma das maiores fontes de incerteza vertical nos levantamentos batimétricos consiste no processo de redução de sondagem, isso ocorre, pois, a maré

medida na costa não necessariamente será a mesma no local e instante onde se encontra a plataforma de sondagem. Uma das formas de reduzir consideravelmente tais incertezas consiste em utilizar a variação das altitudes elipsoidais da antena GNSS da lancha como representativa das oscilações do nível do mar e da atitude da embarcação. Tradicionalmente, a DHN utiliza para o posicionamento de navios, um sistema de posicionamento com correção Global (GcDGNSS) pago, desenvolvido pela NASA, que utiliza o *software RTG*. Todavia, nesse artigo foi apresentado que outros métodos de posicionamento pós-processados como o PPP e o PPK são capazes de apresentar resultados para o posicionamento vertical com graus de incerteza menores e com maior disponibilidade do que o RTG. Como a componente vertical é a mais afetada pelos erros do sinal GNSS, presume-se que também para a componente horizontal serão observados melhores resultados. Mais discussões precisam ser feitas a fim de identificar se as vantagens dos sistemas em tempo real, elencadas nesse artigo, compensam o seu custo para os levantamentos hidrográficos, em uma escala nacional.

9. REFERÊNCIAS

ABDALLAH, A. T. M. *Precise Point Positioning for Kinematic Applications to Improve Hydrographic Survey, 2016. Tese (Doctorate of Engineering Sciences) – Institute of Engineering Geodesy (IIGS), University of Stuttgart, 2016.* Disponível em: <https://elib.uni-stuttgart.de/handle/11682/9043>. Acesso em: 31 jul 2021.



ARROYO-SUAREZ, E. N.; HSIAO, V.; MABEY, D. L. *Implementation of a positioning and telemetry buoy to determine chart datum for hydrographic survey applications. Proceedings of MTS/IEEE OCEANS*, 2005, v. 2005, p. 1726–1728, 2005.

COSTA, S. M. A., LIMA, M. A. A., MOURA JUNIOR, N. J. de, ABREU, M. A., DA SILVA, A. L. e FORTES, L. P. S. RBMC em Tempo Real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, 2008.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES GÉOMÈTRES (FIG). *Cost Effective Precise Positioning with GNSS. N. 57. Copenhagen, Denmark*. 2019. Disponível em: <<https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub57/Figpub57.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2020.

FORTES, L. P. S. Especificações e normas gerais para levantamentos GPS. (versão preliminar) Fator GIS – Revista do Geoprocessamento., n. 05, p. 31-34, 1994.

Nischan, Thomas. (2016). *GFZRNX - RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox (Version 1.05)*. 10.5880/GFZ.1.1.2016.002.

IGNS – *International GNSS Service*. Disponível em: <https://www.igs.org/products/#-real_time_comparison>. Acesso 13 de julho de 2021.

KONGSBERG. *Kongsberg 3710 receiver differential GNSS receiver instruction manual*. 2013. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/manual/1422390/Kongsberg-3710.html>>. Acesso em 20 jun. 2021.

MANN, D.; MANAGER, S. S.; GEOSURVEY, G. *GPS Techniques in Tidal Modelling. International Hydrographic Review*, v. 8, n. 2, p. 59–71, 2007.

MILLS, J.; DODD, D. *Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography; FIG: Copenhagen, Denmark*, 2014; Disponível on-line: <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub62/Figpub62.pdf> (acessado em 23 de Novembro de 2021).

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2ª ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables*. 2019. Disponível em: <<https://nauticalcharts.noaa.gov/publications/docs/standards-and-requirements/specs/hssd-2019.pdf>>. Acesso em: 31 jul. 2021.



KONGSBERG. *Kongsberg 3710 receiver differential GNSS receiver instruction manual*. 2013. Disponível em: <<https://www.manualslib.com/manual/1422390/Kongsberg-3710.html>>. Acesso em 20 jun 2021.

KRUEGER, C. P. Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho. 1996. 288 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

KRUEGER C. P., SILVA N.G., SOUZA V. A., Utilização da boia GPS Hydrolevel na redução da sondagem. *Anais Hidrográficos*. Tomo LXIX. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/anais/ah_2012_0.pdf. Acesso em: 22 mai. 2023.

ORGANIZAÇÃO HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL (OHI). *IHO Standards for Hydrographic Surveys. Principauté de Monaco*. 2020a. Disponível em: <https://iho.int/uploads/user/pubs/Drafts/S-44_Edition_6.0.0-Final.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2020.

RAMOS, A. M. Aplicação, Investigação e Análise da Metodologia de Reduções Batimétricas Através do Método GPS Diferencial Preciso. 2007. 227 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

RIZOS, C., JANSSEN, V., ROBERTS, C., GRINTER, T. (2012): *Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End?*. FIG Work in Week, 6-10 May, Rome, Italy.

SANTANA, F. R Determinação e validação de modelos de separação de superfícies com referência ao elipsoide pelo gnss e gnss/ins. 2022. 154 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

SANTANA, T. A. Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Mapa de Levantamento Hidrográfico. Curitiba: UFPR. Escala 1:2.000; 1:100.000; 1:800.000. 2022.

Seeber, G. *Satellite Geodesy Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. 2 ed. Berlin. New York: Walter de Gruyter, 2003.

T.Takasu, *RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS*, FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, November 2, 2009.



SILVA, 2015, Marés 111 f. Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Disponibilizado pessoalmente para O Autor.

WARDWELL. *Offshore Vertical Datum Separations From Post-Processed Kinematic (Ppk) Heights Observed Along a Scheduled Ferry Route, 2008. Tese (Master in Ocean Science in Earth Science: Ocean Mapping), University of New Hampshire.* Disponível em: <http://ccom.unh.edu/publications/establishing-chart-datum-across-bay-fundy-using-virtual-tide-gauges>. Acesso em 31 jul 2021.

WELLS, D., 1987, *Guide to GPS positioning: Canadian GPS Associates, Fredericton, NB* ZHENG J. *WHAT IS BOX PLOT?* 2021. Disponível em: <https://jingwen-z.github.io/what-is-box-plot/>. Acesso em 03 ago 2021.

ZIEBART, M.; ILIFFE, J.; TURNER, J.; OLIVEIRA, J.; ADAMS, R. VORF - *The UK Vertical Offshore Reference Frame: Enabling Real-time Hydrographic Surveying. THE 20TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2007). Proceedings...* Fort Worth, TX, September 2007, pp. 1943-1949.

ZUMBERGE, J. F., HEFLIN, M. B., JEFFERSON, D. C., WATKINS, M. M., & WEBB, F. H. (1997). *Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B3), 5005–5017.* Disponível em: <https://doi.org/10.1029/96jb03860>. Acesso em 20 jun 2021





VEÍCULO DE SUPERFÍCIE NÃO TRIPULADO EXPERIMENTAL – VSNT-e: UMA AVALIAÇÃO OPERACIONAL À LUZ DA HIDROGRAFIA

Thiago Zamith Cunha^{1*}
*Cláudio Coreixas de Moraes*²
*André Ribeiro Bretinger*³

RESUMO

O propósito deste trabalho é evidenciar a utilização do Veículo de Superfície Não Tripulado Experimental – VSNT-e, implementado pelo Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV), como possível plataforma para coleta de dados batimétricos e de retroespalhamento acústico, em apoio aos Levantamentos Hidroceanográficos (LH), seja para atualização de elementos de cartas náuticas ou para o atendimento às demandas do setor operativo. Por meio de testes realizados nas proximidades da Escola Naval (RJ), a plataforma VSNT-e foi equipada, respectivamente, com os sensores acústicos: *R2Sonic 2024*, *WingHead i77h* e o Sonar de Varredura Lateral (SVL) *EdgeTech 4175i*. Por fim, seu emprego operativo servirá como laboratório para formulação de futuras doutrinas nas guerras de superfícies, guerra assimétrica, operações de Contramedidas de Minagem e operações anfíbias, além de possuir grande potencial para testes com produtos desenvolvidos

¹ Oficial do Corpo da Armada, encontra-se operando no Navio Polar “Almirante Maximiano”, seus interesses de pesquisa versam sobre Hidrodinâmica Costeira, Hidroceanografia e Modelagem Oceanográfica.

² Oficial do Corpo da Armada da Reserva Renumerada, Doutor em Engenharia Naval e Oceânica pela COPPE/UFRJ, atualmente faz parte, como pesquisador, de projeto do CNPq para Simulações em modelos de realidade aumentada.

³ Oficial do Corpo da Armada, atua como Analista na Divisão de Modelagem e Simulação do CASNAV.



pelo CASNAV, Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) que sejam correlacionados com o *e-Navigation* e com o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAZ). O estudo obteve êxito na aquisição de dados e demonstrou grande potencial para possível utilização nos LH e na identificação de alvos previamente estabelecidos. Dentre as principais contribuições práticas, destacam-se a utilização do VSNT-e no emprego acadêmico em auxílio às pesquisas aplicadas ao Sistema de Ensino Naval (SEN), Empresas da Base Industrial de Defesa (BID) e integração de sistemas de Inteligência Artificial.

Palavras-chave: VSNT-e; Hidrografia; Operações Navais.

ABSTRACT

The purpose of this work is to highlight the use of the Experimental Unmanned Surface Vehicle - VSNT-e, implemented by the Center for Naval Systems Analysis (CNSA), as a possible platform for collecting bathymetric and acoustic backscatter data, in support of Hydroceanographic Surveys (LH), either to update elements of nautical charts or to meet the demands of the operating sector. Through tests carried out near the Escola Naval (RJ), the VSNT-e platform was equipped, respectively, with the acoustic sensors: R2Sonic 2024, WingHead i77h and the Side Scan Sonar (SSS) EdgeTech 4175i. Finally, its operational use will serve as a laboratory for the formulation of future doctrines in surface warfare, asymmetric warfare, Mine Countermeasures operations and amphibious operations,

in addition to having great potential for testing products developed by CNSA, Naval Hydrography Center (NHC) that are correlated with *e-Navigation* and the Blue Amazon Management System (BAMS). The study was successful in data acquisition, and demonstrated great potential for possible use in LH and in the identification of previously established targets. Among the main practical contributions, we highlight the use of VSNT-e in academic use in support of research applied to the Naval Education System (NES), Companies of the Defense Industrial Base (DIB), integration of Artificial Intelligence systems.

Keywords: VSNT-e; Hydrography. Naval Operations.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A realização de Levantamentos Hidroceanográficos (LH) é uma tarefa complexa e fundamental nas diversas áreas relacionadas à segurança da navegação, à exploração de recursos marinhos e à gestão ambiental. Para realizar esses trabalhos, equipes de profissionais utilizam embarcações e equipamentos especializados, o que pode ser oneroso, demorado e até mesmo perigoso em algumas situações. Recentemente, o desenvolvimento de um Veículo de Superfície Não Tripulado (VSNT) pelo Centro de Análise de Sistemas Navais (CASNAV) tem oferecido novas possibilidades para a realização destes trabalhos de forma mais eficiente, segura e econômica.

Por conseguinte, e baseando-se nos argumentos que se desenvolverão neste artigo e de bibliografia apropriada, pode-se inferir que a plataforma VSNT-e detém potencial para atender às demandas afetas à identificação de alvos, em virtude das condições e parâmetros pre-estabelecidos, tal como sua utilização em apoio ao ensino naval e futuros trabalhos ligados à hidroceanografia.

O objetivo geral desta pesquisa é descrever os testes realizados com a plataforma VSNT-e e ilustrar os resultados obtidos quanto à busca e identificação de contatos previamente definidos. Ademais, descrever também o esquema de sensores e *softwares* utilizados em cada experimento.

NORBIT SUBSEA (2021) e R2SONIC (2012) versam sobre a grande capacidade de resolução espacial e performance destes equipamentos quando aplicados em trabalhos hidrográficos e caracterizam suas especificidades técnicas quanto à montagem. Além disso, EDGETECH (2021) caracteriza as condições e cuidados alusivos ao SVL empregado neste trabalho. O eixo central deste estudo monta-se, tão somente, quanto à capacidade adaptativa da plataforma VSNT-e aos sensores utilizados, sem preocupação com a adequação da plataforma aos requisitos técnicos preconizados pelas autoridades reconhecidas. Para esse estudo, definiu-se “sondagem operacional” àquela em que a coleta de dados ocorreu satisfatoriamente, seguindo diretrizes previstas nas Instruções Técnicas do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM).

As seguintes questões serão levantadas:

- A identificação dos alvos pré-definidos e aquisição de dados batimétricos ocorreu satisfatoriamente?

- A plataforma VSNT-e poderá ser utilizada em apoio a Levantamentos Hidroceanográficos?

Por fim, foi realizado levantamento inicial no banco de manuais da *Norbit SubSea*, *R2Sonic* e Centro de Hidrografia da Marinha (CHM), por meio de suas Instruções Técnicas relacionadas à pesquisa em lide.

A abordagem foi de cunho operacional. Não obstante, foi utilizada a técnica de coleta de dados por meio da pesquisa documental como técnica exploratória.

Estipulou-se, então, o problema de pesquisa:

O VSTN-E pode ser considerado uma ferramenta para futuros trabalhos junto ao SEN e atividades operacionais?

Desse modo, à luz das Operações Navais, o emprego dos sensores em conjunto com a plataforma VSNT-e, com a finalidade de identificar e localizar possíveis ameaças subaquáticas, como minas e artefatos explosivos, que possam representar riscos às operações navais e à segurança marítima. Com o emprego dessas tecnologias, espera-se evidenciar a efetividade nas Operações de Contramedidas de Minaagem, proporcionando um ambiente mais seguro para os navios e tripulações. Foram utilizados como ferramentas para coleta de dados desse estudo os *softwares* de aquisição: *DCT v.2021*, *Discovery 4125i* e *Hypack v.2021* e, posteriormente, para fins de processamento, o *software Quimera v.2.5.0*. A Figura.1, ilustra a VSNT-e conciliada à haste lateral.



Figura 1 – VSNT-e

2. METODOLOGIA

Inicialmente, a plataforma VSNT-e foi implementada por meio de uma lancha de casco semirrígida, equipada com motor *Mercury* de 200HP e sensores diversos de navegação, dentre os quais vale citar: Sistema CITRA e, por fim, o Rádio MESH IP e Barramento de Monitoramento *Smart Craft* que permitem, quando integrados, com os sensores já citados, o acompanhamento e controle da embarcação remotamente, além de outros sensores utilizados para navegação, que, posteriormente, foram utilizados para o controle da plataforma na execução das linhas de sondagem e linhas de varredura.

Nesse diapasão, o experimento como um todo, foi idealizado e subdividido em testes, cada qual com um sensor específico. À primeira vista, surgia o desafio de adaptação dos sensores ao VSNT-e, a qual uma haste lateral seria ajustada aos três sensores, de maneira independente. Assim, com o apoio do LabOceano/UFRJ, a haste foi projetada, desenvolvida e testada com sucesso de modo que todos os sistemas ajustados fossem capazes de coletar dados de maneira contínua e em tempo real.

Vale ressaltar que os *offsets* atribuídos aos três esquemas foram retirados e calculados *in loco* e inseridos nos respectivos sistemas de aquisição. Ademais, nos experimentos envolvendo Ecobatímetros Multifeixe (EM), foram seguidos os padrões preconizados à luz da S-44 6ª ed, além de todas etapas intrínsecas relacionadas a um LH, isto é, perfilagem do som, calibrações e outros aspectos correlatos e necessários ao trabalho.

Não obstante, a evolução metodológica deu-se da seguinte forma:

1. Teste A, em que o VSNT-e foi empregado com o SVL cujo objetivo principal foi gerar dados de retroespalhamento acústico, os quais foram apresentados na forma de imagem para se associar geologia e feições de interesse. Neste último caso, foram dispostos, por mergulhadores, dois pneus de dimensões conhecidas, em posições distintas. Isto posto, caracterizar os objetos antrópicos pré-definidos (pneus), tornava-se a ideia principal.

2. Teste B, em que a VSNT-e foi empregada com o EM *R2Sonic* 2024, cujo objetivo principal foi verificar a exequibilidade de se realizar uma sondagem multifeixe, uma vez que os periféricos envolvidos tornavam a montagem do esquema mais complexa, e, secundariamente, localizar e caracterizar outros objetos antrópicos (âncora); e

3. Teste C, em que a VSNT-e foi empregada com o EM *WingHead* i77h, cujo objetivo principal foi verificar a exequibilidade de se realizar uma sondagem multifeixe, com sensores periféricos distintos do anterior, exigindo capacidade

adaptativa da plataforma, em termos de montagem do esquema de sondagem e sua operacionalidade na aquisição dos dados. Ademais, localizar e caracterizar objetos antrópicos (tonéis).

Vale ressaltar que o experimento se valeu de condições de contorno previamente estabelecidas: campo de prova (Escola Naval-RJ), profundidades e feições submarinas tomadas com base na Carta Náutica (CN) 1512, além dos objetos lançados (pneus e tonéis) para este estudo. Os testes ocorreram entre os meses de janeiro e agosto de 2022.

Conquanto, os parâmetros acústicos básicos dos sistemas utilizados foram ajustados para atender os objetivos acima. Segue, abaixo, Figura.2, ilustrando os ajustes dos sensores no VSNT-e.



Figura 2 – Configuração dos sensores no VSNT-e, respectivamente da esquerda para direita. SVL Edgtech 4125i, R2Sonic 2024 e WingHead i77h

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Teste A: VSNT-E/Sonar de Varredura Lateral EdgeTech 4125i

Com o propósito já definido e integrado, vale ressaltar que, por ser uma embarcação sem dispositivo de reboque,

o ajuste do SVL ao VSNT-e foi concebido através de fixação e arriamento abaixo da linha d'água, de maneira que a qualidade do dado se mantivesse em boas condições.

Foram utilizadas frequências de 900 kHz/400 kHz e velocidade do som fixada em 1500 m/s, *offsets* correlatos inseridos no *software* de aquisição, a despeito do valor empregado no modelo matemático catenária ter sido igual a “1”, o parâmetro *cable out* inserido foi igual a “0”, uma vez que o sensor se encontrava fixo à haste. Ademais, os parâmetros de *Gain*, *Time Variable Gain* (TVG) foram constantemente ajustados ao longo da varredura, a fim de otimizar os resultados. Por fim, como resultado desse estudo, a localização e caracterização dos objetos pré-definidos (pneus) foi alcançada com êxito, conforme Figura 3 demonstrativa, em que foi possível identificar dois pneus e, inclusive, no momento da varredura, o mergulhador ao fundo e as bolhas de ar produzidas por ele.

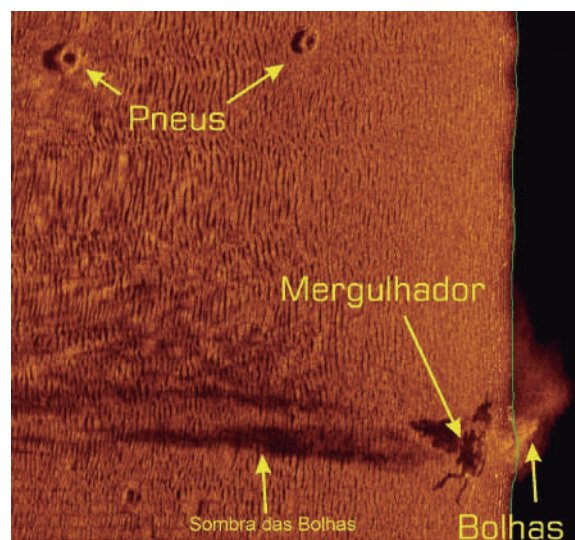


Figura 3 – Configuração – VSNT-e/SVL e resultados



3.2. Teste B: VSNT-e/EM R2Sonic 2024

Caracterizando-se como o primeiro teste com equipamentos de sondagem, procurou-se dispor os componentes periféricos ao EM R2Sonic 2024, de maneira a tornar a sondagem fluida e sistemática, a fim de validar o experimento. Assim, foram utilizados os seguintes sensores periféricos, parâmetros e demais disposições relevantes neste esquema:

- Aquisição e controle dos parâmetros da sondagem: *Sonic Control* e *Hypack Max* e *Hyswwep v 2021*;
- Atitude: *SBG Systems Ekinox-E* com posicionamento diferencial integrado (Fulgro Marinestar). Os *offsets* do *setup* hidrográfico foram inseridos no software proprietário deste INS;
- *Draft* inserido no software de aquisição (*Hypack*); e
- Parâmetros de velocidade do som eram enviados online diretamente à SIM (*Sonar Interface Module – R2Sonic*), onde esta recebia os dados da *Inertial Measurement Unit* (IMU) e encaminhava a informação ao software de aquisição específico do sonar. Outrossim, foi utilizado sensor ValePort para perfilagem do som, quando necessário.

Os tonéis de metal (200 litros), foram dispostos deitados no fundo da área-teste com a ajuda de mergulhadores. Destarte, a sondagem tornou-se operacional e os alvos pré-definidos foram identificados, os seguintes resultados foram obtidos, conforme Figura 4, em que cada paleta de cores é associada ao arquivo bruto de cada linha de sondagem.

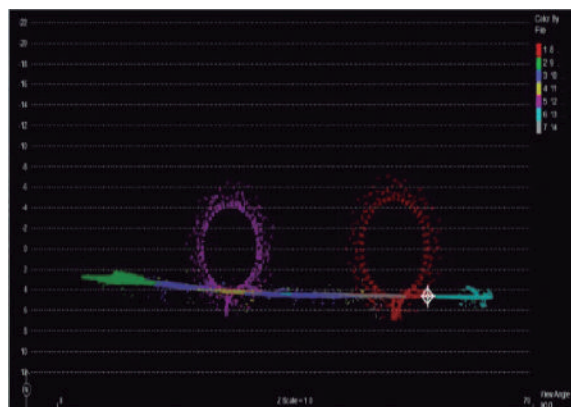


Figura 4 – Configuração - VSNT-e/EM R2Sonic 2024 - resultados

Nota-se que os alvos pré-definidos (tonéis) foram identificados por meio do contorno antrópico observado em determinada linha de sondagem no software de processamento *Hypack Max* e *Hyswwep v 2021*. Outrossim, foram realizadas linhas-teste com o propósito de avaliar a qualidade dos dados adquiridos, a fim de garantir a verticalidade e escoamento laminar adequado no transdutor. Dessa forma, ajustes mecânicos na haste foram necessários e posteriormente a sondagem ocorreu satisfatoriamente.

3.3. Teste C: VSNT-e/EM WingHead i77h

O último teste se deu por meio da identificação de um objeto pré-definido escolhido, neste caso, uma âncora (ferro) do tipo “Almirantado”, com localização conhecida e reconhecido por mergulhadores no local. Dessa maneira, foram utilizados os seguintes sensores periféricos, parâmetros e demais disposições relevantes neste esquema:

- IMU *SBG Ekinox-D* integrada ao transdutor, facilitando a medição dos *offsets*, em que, posteriormente, foram inseridos no software de aquisição DTC;

- Parâmetros de velocidade do som inseridos quando a variação se apresentava maior que 2m/s. Foi utilizado o sensor RT SV AML-3 para perfilagem;
- Realizada calibração imediatamente antes do início das atividades, calculada e inserida no *software* de aquisição (DTC);
- Foi utilizado o *software BeamworX* para posterior refinamento da atitude e posicionamento, ao serem gerados os arquivos auxiliares SBET e RMS e *delayed heave*;
- Foi utilizado posicionamento por meio do método RTK/GSM; e
- Todas as informações eram concentradas na estação de trabalho de aquisição, oriundas da Unidade de Processamento.

Posteriormente os dados foram processados e o alvo localizado, conforme Figura 5, abaixo, demonstrativa.

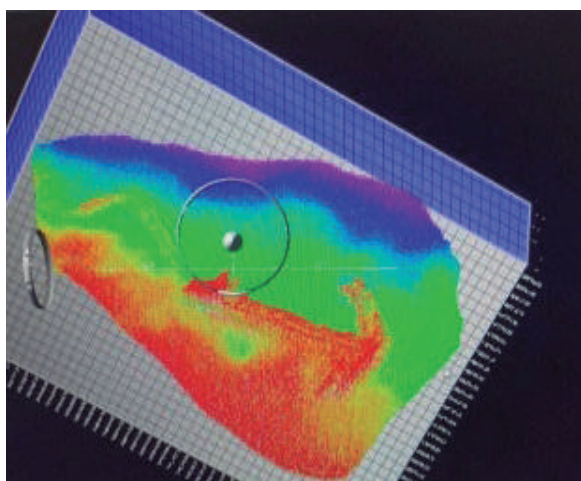


Figura 5 – Configuração - VSNT-e/EM WingHead i77h - resultado

4. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos durante os experimentos com o Veículo

de Superfície Não Tripulado Experimental – VSNT-e, integrado aos três sensores supracitados, pode-se concluir que as atividades foram bem-sucedidas. Os testes foram capazes de localizar objetos no fundo do mar. O Projeto desenvolvido pelo CASNAV, em conjunto com sensores específicos e pessoal capacitado, pode ser uma ferramenta valiosa para as finalidades hidrográficas e operativas. Assim, para futuros estudos, cabe o incentivo à criação de grupos de trabalhos específicos, entre as organizações civis e militares diretamente relacionadas ao objeto de estudo deste artigo. Além disso, vale ressaltar, as promissoras aplicações que incluem: aprimorar a pesquisa oceanográfica, o monitoramento ambiental, a detecção de naufrágios e varreduras SVL em canais nas aproximações portuárias de interesse estratégico.

Por fim, sugere-se que o projeto possa ser aplicado em experimentos com minas submarinas reais em campo de teste controlado a fim de ratificar as capacidades ora discutidas neste trabalho, além de ser aplicado em proveito de atividades de pesquisa correlatas junto ao Sistema de Ensino Naval (SEN), ao Centro de Sistemas Navais (CASNAV) e outros estudos que mirem a Hidrografia Militar como objetivo principal.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, ao Centro de Análise de Sistemas Navais, e ao COPPE/UFRJ pelo apoio dado no desenvolvimento das atividades e pelas suas valiosas contribuições para que este trabalho lograsse êxito.



6. REFERÊNCIAS

EDGETECH. 4125I/4125 *Side Scan Sonar System. User Hardware Manual 0004823_rev_h : User Manual*. 2021. 122p.

NORBIT SUBSEA. *Multibeam Sonar: User and Technical Manual*. 2020.103p.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. Instruções Técnicas - Tomo I/II. Niterói, 2020. Disponível em: <<https://www.dhn.mb/?q=Publicações>>. Acesso em: 06 jun 2022.

R2 SONIC. *Broadband Multibeam Echosounders: Operation Manual V4.1*. 2012. 176p.



VII – EFEMÉRIDES HIDROGRÁFICAS

GRUPAMENTOS DE NAVIOS HIDROCEANOGRÁFICOS (GNHo)

✿ Em 16 de março, o Navio Hidrográfico “Sirius” – verdadeira escola da Hidrografia – arriou seu Pavilhão Nacional pela última vez, após 64 anos de serviço à Armada e mais de 840 mil milhas navegadas.

✿ Cerimônia para comemoração dos 40 anos da OPERANTAR – Animados pelos exemplos de coragem da tripulação da

OPERANTAR I e dos ex-Comandantes dos Navios antárticos, reunidos em cerimônia para comemoração dos 40 anos da OPERANTAR, o Navio Polar “Almirante Maximiano” e o Navio de Apoio Oceanográfico “Ary Rongel” desatracaram na data prevista para a OPERANTAR XLI, dando início às suas 14ª e 29ª expedições, respectivamente, e atracaram em 12 de abril de 2023.

AVISO DE PESQUISA HIDROCEANOGRÁFICO “ASPIRANTE MOURA”

✿ No período de 22 de agosto a 12 de setembro, o Aviso de Pesquisa Hidroceanoográfico “Aspirante Moura” realizou o geomapeamento integral do fundo no canal de acesso à Base de Submarinos da Ilha da Madeira (BSIM), com Sonar de Varredura Lateral (SVL), a fim de identificar feições submarinas naturais ou antrópicas na área.

✿ No período de 14 de novembro a 9 de dezembro, o Navio realizou o Levantamento Hidroceanoográfico de Fim de Curso (LHFC-2022), a fim de apoiar instruções aos futuros hidrógrafos, Oficiais e Praças, por meio da obtenção de dados hidroceano-

gráficos e de auxílios à navegação dentro da Baía de Guanabara, mediante a realização de sondagens batimétricas, coleta de amostras geológicas e varredura com Sonar de Varredura Lateral em áreas pré-definidas.

✿ O Navio realizou, entre os dias 12 e 16 de dezembro, o Levantamento Hidroceanoográfico na parte interna do cais recém-construído da Base de Submarinos da Ilha da Madeira (BSIM), a fim de coletar dados batimétricos para verificar a profundidade na área, com o propósito de subsidiar a Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN).

NAVIO HIDROCEANOGRÁFICO FAROLEIRO “ALMIRANTE GRAÇA ARANHA”

✿ Entre os dias 11 e 14 de fevereiro, o Navio Hidroceanoográfico Faroleiro “Almirante Graça Aranha” realizou a comissão “Apoio à

Coordenadoria-Geral do Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear (COGESN) I”, contribuindo para os testes de aceitação no mar do



Submarino “Riachuelo”, com a sua escolta durante o deslocamento e com o recolhimento, pelo Navio, de um torpedo dotado com cabeça de exercício.

✿ No período de 18 de agosto a 15 de setembro, o Navio realizou comissão para reforçar a ação de presença e para estreitar laços de amizade com a Armada da República Oriental do Uruguai, por meio da participação no evento anual da Comissão Hidrográfica do Atlântico Sudoeste (CHAtSO), fortalecendo a imagem do

país junto à OHI, e no evento da Aliança Regional para a Oceanografia no Atlântico Sudoeste Superior e Tropical (OCEATLAN)

✿ Entre os dias 7 e 21 de novembro, o Navio realizou o transporte de pesquisadores para a Ilha da Trindade, a fim de atender ao PROTRINDADE, contando com o embarque de 11 pesquisadores, contribuindo para os projetos PELD ILOC (Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração das Ilhas Oceânicas) e Petrogênese da Cadeia Vitória-Trindade.

NAVIO DE PESQUISA HIDROCEANOGRÁFICO “VITAL DE OLIVEIRA”

✿ No período de 8 de novembro a 21 de dezembro, o Navio realizou a Comissão COMITÊ GESTOR II / 2022, a fim de contribuir para o estabelecimento, no seu enfoque jurídico, do limite da Plataforma Continental além das 200 MN da

ZEE, por meio de levantamento geofísico na área da ERG, em apoio ao SGB-CPRM, e no extremo Sul da Bacia de Santos em atendimento à PETROBRAS e ao projeto internacional *iAtlantic*, dedicado ao estudo de ecossistemas profundos do Atlântico.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM)

✿ Em 8 de abril de 2022, foi concluído o curso *Marine Geospatial Information Program* (S-8B) — Programa de Informação Geoespacial Marinha, com formação de 14 alunos (9 do CHM e 5 do CIAARA), fruto de contrato celebrado entre o CHM e a empresa IIC *Technologies* Ltd., certificada pela Organização Hidrográfica Internacional (OHI).

✿ No âmbito do projeto REMObs/PNBOIA, foram lançadas, em abril, uma boia em Alcatrazes (SP) e outra em Abrolhos (BA). Em junho, ocorreu o lançamento de uma boia ondógrafo em Fernando de Noronha, com a instalação do marégrafo integrante da rede GLOSS.

✿ O Serviço Meteorológico Marinho brasileiro realizou o monitoramento da Tempestade Subtropical *Yakecan*, que se originou na noite do dia 16 de maio de 2022, a 640 milhas náuticas (1186 km) da costa. O sistema atuou até a manhã do dia 19 de maio de 2022, apresentando ventos máximos de 55 nós e ondas de até 7,3 metros de altura, conforme estimativas de sensores satelitais.

✿ Em agosto de 2022, foi concluída a migração da Base de Dados Batimétricos para o EXADATA, *hardware* de alto desempenho para armazenamento de banco de dados. Neste mesmo momento, foi atualizada a suíte *Bathy DataBASE* para a versão 5.5,



que inclui uma nova seleção de sondagem para cartografia, melhorias na automação de processos e suporte a produtos S-100.

✿ Em setembro de 2022, o CHM realizou o 1º levantamento aerofotogramétrico com aeronave remotamente pilotada (ARP), em Maceió-AL. O pioneiro trabalho coletou dados de contorno para a atualização das Cartas Náuticas nº 920 e 921. A ARP passou a ser empregada em substituição ao Sistema Aerotransportado de Aquisição e Pós-Processamento de Imagens (SAAPI-MAR).

✿ No dia 4 de outubro de 2022, durante a celebração do Dia do Hidrógrafo, houve o lançamento do Geoportal da Infraestrutura de Dados Espaciais Marinhos da DHN (IDEM-DHN), um marco no compartilhamento de dados geoespaciais abertos,

no âmbito da DHN. O Geoportal (disponível para acesso em <https://idem.dhn.mar.mil.br/>) visa atender a compromissos nacionais e internacionais do Brasil, no que tange ao intercâmbio de dados ambientais marinhos.

✿ Em dezembro, foram lançadas duas boias na Bacia de Santos (SP), sendo uma Axys e uma BMO-BR, além de uma boia Triaxys em Cabo Frio (RJ). Ainda no mês de dezembro, durante a OPERANTAR XLI (2022-2023), foram fundeadas três boias e realizado o lançamento de boias ondógrafos de deriva na confluência Brasil Malvinas e no Estreito de Drake.

✿ Durante o ano de 2022, foram emitidos 9.512 boletins de previsão meteorológica especial (BPME), 1.114 avisos de mau tempo, 256 boletins de informações ambientais (BIA) e 38 boletins climatológicos (BC).

CENTRO DE INSTRUÇÃO E ADESTRAMENTO ALMIRANTE RADLER DE AQUINO (CIAARA)

✿ Em 24 de fevereiro, o Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino realizou o *Workshop* de Oceanografia, com apoio da Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, promovido pelo escritório da empresa NORTEK no Brasil. O evento foi conduzido em duas etapas: uma expositiva, realizada nas dependências deste Centro de Instrução e Adestramento; e uma embarcada na Lancha Miguens, pertencente à Base de Hidrografia da Marinha em Niterói, por meio do levantamento de dados do ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*).

No dia 8 de abril, o CIAARA realizou a cerimônia de conclusão do Curso *Marine Geospatial Information Program* (S-8B) — Programa de Informação Geoespacial Marinha, iniciado em 4 de outubro de 2021.

✿ No dia 12 de abril, o CIAARA, em atendimento ao treinamento e a qualificação dos docentes previsto no Plano Anual de Orientação Pedagógica (PLANOP), promoveu uma palestra para o corpo docente do CNPA sobre o tema “Ética para além da Docência”, ministrada pela Capitão de Mar e Guerra Natália Moraes Corrêa Borges de Aguiar.



✿ No período de 16 a 27 de maio de 2022, o Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino realizou o Curso Especial de Operações em Águas Polares. O curso tem o propósito de habilitar Oficiais e Praças das tripulações dos Navios que operam na Antártica para o exercício das funções afetas à navegação em águas polares e ao seu planejamento; ao serviço de passadiço; à previsão e acompanhamento meteorológicos; e à condução e gerenciamento de risco das diversas operações no ambiente antártico.

✿ No dia 22 de setembro de 2022, foi realizada a Visita do Almirantado Programada (VAP) no Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino, conduzida pelo Almirante de Esquadra Silva Lima, Chefe de Logística e Mobilização do Estado-Maior Conjunto das Forças Armadas e comitiva.

✿ No dia 13 de outubro de 2022, o Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA) recebeu a visita da Sr^a. Mary de Abreu e Souza e do Sr. Luiz Fernando de Abreu e Souza, respectivamente sobrinha-neta e sobrinho-bisneto, do Almirante Radler de Aquino, que dá nome a esta Organização Militar, acompanhados de seus familiares.

✿ Após um período de dois anos de trabalho na preparação dos documentos exigidos, o Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA) obteve êxito na submissão à Organização Hidrográfica Internacional

(OHI) dos currículos dos Cursos de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais (CAHO) e de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação para Sargentos (C-Ap-HN) e recebeu as certificações em outubro de 2022.

✿ No período de 07 de novembro a 09 de dezembro de 2022, foi realizada a Comissão de "Sinalização Náutica Aplicada" (SNA), no Farol da Ilha Rasa (RJ), a fim de atualizar e habilitar as Praças pertencentes ao Cursos de Aperfeiçoamento de Faroleiro, no exercício da supervisão e execução de tarefas técnico-profissionais referentes aos Auxílios à Navegação.

✿ No dia 10 de novembro, o Centro de Instrução e Adestramento Almirante Radler de Aquino (CIAARA), realizou um levantamento com uso de Aeronave Remotamente Pilotada, popularmente conhecida como "drone", em parceria com o Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) entre a área que compreende a Ilha de Boa Viagem e o Museu de Arte Contemporânea (MAC), em Niterói.

✿ No dia 1º de dezembro, em proveito das atividades de campo desenvolvidas durante o Levantamento Hidroceanográfico de Fim de Curso (LHFC) do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia para Oficiais (CAHO) e do Curso de Aperfeiçoamento em Hidrografia e Navegação para Praças (C-Ap-HN), os alunos tiveram a oportunidade de executar uma faina de sondagem empregando o Ecobatímetro Multifeixe



EM-2040, a bordo da Lancha “Cehili” em sinergia com uma equipe volante composta por militares do Navio Hidro-

ceanográfico “Amorim do Valle”, subordinado ao Grupamento de Navios Hidroceanográficos.

CENTRO DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO DO OESTE (CHN-6)

✿ Em dezembro de 2022, ocorreu a certificação ISO 9001:2015 do Centro de Hidrografia e Navegação do Oeste (CHN-6), concedida pela empresa “Organismo Nacional de Certificação” (ONC). Nesta primeira certificação, foram auditados os processos de Análise de Levantamentos Hidrográficos e de Geração de

Elementos de Atualização/Construção de Cartas Náuticas, sendo uma importante etapa rumo à plena capacidade de produção cartográfica náutica, que uma vez alcançada, promoverá celeridade na atualização e divulgação desse produto ao navegante, implicando diretamente na segurança da navegação.

CENTRO DE AUXÍLIOS À NAVEGAÇÃO ALMIRANTE MORAES REGO (CAMR)

✿ Durante o mês de Setembro de 2022, uma comissão composta por 05 militares do Centro de Auxílios à Navegação Almirante Moraes Rego realizou a implantação do Radiofarol (RF) Amapá-AP nas dependências da Capitania dos Portos do Amapá em Santana (AP), em substituição ao Radiofarol Canivete, que fora desativado.

✿ No mês de Fevereiro de 2022, foi construído um parque de treinamento de montagem de torre irradiante no Radiofarol (RF) São Tomé, localizado em Campo dos Goytacazes – RJ, por militares do Centro de Auxílios à Navegação Almirante Moraes Rego, a fim de aprimorar o adestramento do grupo de eletrônica (ET).





MARINHA DO BRASIL

BRASIL - COSTA SUL

BAÍA DE GUANABARA

PROFUNDIDADES EM METROS

ESCALA 1: 50 000 (22°52',80)

Profundidades em metros reduzidas aproximadamente ao nível da baixa-mar média de sizígia.

Altitudes em metros acima do nível médio do mar.

Posições referidas ao Datum WGS-84.

Sinais de Navegação: Sistema de Balizamento Marítimo da IALA - Região B.

Projeção: Mercator.

Levantamentos: Ver Diagrama de Levantamentos quanto a informações que possam afetar o uso desta carta.

PONTE PRESIDENTE COSTA E SILVA

TRÁFEGO SOB A PONTE: O tráfego de embarcações sob a Ponte Presidente Costa e Silva só é permitido entre os pilares assinalados. O tráfego sob o vão central, entre os pilares 100 e 101, é privativo de navios de mais de 12,19m (40 pés) de calado ou 50 000 TDW. As embarcações entre 1 000 e 50 000 TDW somente deverão trafegar sob os vãos principais adjacentes ao central e seguir as indicações.

ÁREA DE SEGURANÇA: O emprego de rebocadores para o tráfego de navios ou embarcações na área de segurança da ponte, deverá ser de acordo com as normas de tráfego e permanência no porto. O fundeio e a pesca são proibidos na área assinalada.

ADVERTÊNCIA

Nas proximidades dos aeroportos os navios e embarcações devem ter especial atenção com aviões à baixa altitude, em pouso ou decolagem. É proibido operar guindastes ou lanças que devam permanecer na posição horizontal. A pesca a menos de 400m das beiradas das pistas dos aeroportos é proibida.

CAUTELA

Existência de estacas duplas ao longo da canalização, permitindo apenas a passagem de pequenas embarcações.

INFLAMÁVEIS

Existência de gasôdutos e de parque de armazenamento de gás liquefeito de petróleo com carga e descarga de inflamáveis. São proibidos fundeio, pesca e uso de chamas na área delimitada.

ÁREA PROIBIDA

Proibida a navegação, a menos que expressamente autorizada.

TRAJETO DE BARCAS

Proibido o fundeio no trajeto das barcas Rio-Niterói, em uma faixa de 300m para cada lado do percurso.

CANALIZAÇÕES SUBMARINAS

Os navios, quando em movimento na Baía de Guanabara, deverão manter os ferros (âncoras) acima da linha de flutuação, a fim de evitar a possibilidade de danos a cabos e canalizações submarinas. São proibidos o fundeio e a pesca a menos de 500 metros destes.

CABOS SUBMARINOS

Existência de inúmeros cabos submarinos ativados e desativados atarrando entre a Ponte de Copacabana e do Leme, vindo de direções diversas. O fundeio fora da barra só deve ser efetuado na área indicada.

ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL

O Complexo Hidrológico da Área de Proteção Ambiental de Guapimirim está demarcado por balizamento luminoso particular (dezenove (19) faróis equipados com refletor radar), não representados em carta e posicionados sobre a linha demarcatória do "limite de área restrita". O balizamento está sujeito a alterações não divulgadas por "Aviso aos Navegantes".



Acesse os Anais Hidrográficos pelo QR CODE

ou em: <https://www.marinha.mil.br/dhn/?q=pt-br/anais-hidrograficos>.