

RAIANE RINTIELLE VAZ MENEZES

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS OBTIDOS A
PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Ítalo Oliveira Ferreira

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M543a Menezes, Raiane Rintielle Vaz, 1990-
2023 Avaliação dos níveis de referência hidrográficos obtidos a
partir de dados de altimetria por satélites / Raiane Rintielle Vaz
Menezes. – Viçosa, MG, 2023.
1 tese eletrônica (101 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Ítalo Oliveira Ferreira.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2023.
Inclui bibliografia.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.347>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Geodésia marinha. 2. Altitudes -Medição. 3. Hidrografia.
I. Ferreira, Ítalo Oliveira, 1988-. II. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 526.1

Bibliotecário(a) responsável: Alice Regina Pinto Pires CRB-6/2523


RAIANE RINTIELLE VAZ MENEZES

**AVALIAÇÃO DOS NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS OBTIDOS A
PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES**


Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 10 de maio de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 RAIANE RINTIELLE VAZ MENEZES
Data: 06/06/2023 17:53:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Raiane Rintielle Vaz Menezes
Autora

Documento assinado digitalmente
 ITALO OLIVEIRA FERREIRA
Data: 06/06/2023 10:26:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ítalo Oliveira Ferreira
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por tornar este sonho possível!

Aos meus pais e família, em especial meus avós Antônio e Terezinha e minha tia Mailza por sempre me incentivarem na busca deste sonho! Ao meu noivo Murillo pelo carinho, companheirismo, motivação, muita paciência e compreensão ao longo desta jornada.

Aos professores da pós-graduação, em especial meu orientador professor Ítalo Oliveira Ferreira, pela orientação e contribuição a este trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela oportunidade de realizar a pós-graduação. Aos funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial Tiago, por me ajudar em todas as vezes que precisei!

Aos velhos amigos da UFV, aos novos da UFPE e Mossoró-RN, em especial Sr. Paulo e Gilmara, pelo incentivo e acolhimento em terra potiguar. Além dos amigos do mundo offshore, pois trabalhar embarcado não é para qualquer um!

A todos que, de forma direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta conquista.

"Nenhum vento sopra a favor de quem não sabe para onde ir".

(Lucius A. Seneca)

RESUMO

MENEZES, Raiane Rintielle Vaz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2023. **Avaliação dos níveis de referência hidrográficos obtidos a partir de dados de altimetria por satélites.** Orientador: Ítalo Oliveira Ferreira.

O presente trabalho objetiva o desenvolvimento de metodologias para a obtenção de Níveis de Referência Hidrográficos (NRH) gerados a partir dos produtos da Altimetria por Satélite (ALTSAT). Neste sentido, são propostas uma série de procedimentos que visam, tratar, definir e avaliar os NRH provenientes de dados ALTSAT, sempre em comparativa com os níveis de referência obtidos por maregrafia. Para isso, apresentou-se os principais conceitos relacionados a dinâmica das marés e níveis de referência considerados nos levantamentos hidrográficos em áreas costeiras e oceânicas, tais como: Nível de Redução (NR) e Nível Médio do Mar (NMM). Primeiramente, foi proposta uma metodologia preliminar para obtenção do NMM a partir de dados ALTSAT, da missão CryoSat-2 (CS-2). A avaliação foi realizada para o NMM e sua variação em comparação com o NMM obtido pela estação maregráfica de Fortaleza, no estado do Ceará. Esta metodologia apresentou resultados promissores. Em seguida, aprimorou-se a metodologia preliminar e ampliou sua aplicabilidade para estações maregráficas localizadas ao longo da costa brasileira, em uma série temporal de nove anos. Por fim, desenvolveu-se uma metodologia inovadora capaz de determinar o NR utilizando dados ALTSAT, para estações localizadas no Nordeste do Brasil. Seus resultados foram analisados e validados a partir do NR definido por maregrafia. De modo geral, para todas as metodologias propostas, os resultados se apresentaram equivalentes e coerentes com os dados maregráficos. Logo, pôde-se concluir que é possível utilizar os dados da missão CS-2 como alternativa à utilização de marégrafos, para a definição de NRH. Visto que, tanto o NMM quanto o NR, provenientes da técnica ALTSAT, apresentaram valores compatíveis com dados de maregrafia. Permitindo-se assim, uma redução dos custos envolvidos além da facilidade para atualização e verificação de níveis hidrográficos.

Palavras-chave: ALTSAT. Maregrafia. CryoSat-2. Hidrografia.

ABSTRACT

MENEZES, Raiane Rintielle Vaz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2023. **Hydrographic reference levels evaluation obtained from satellite altimetry data.** Advisor: Ítalo Oliveira Ferreira.

The present work aims to develop methodologies for obtaining Hydrographic Reference Levels (HRL) generated from satellite altimetry data (ALTSAT). In this sense, a series of methodologies are proposed that aim at treating, defining and statistically evaluating the hydrographic reference levels from ALTSAT data, always in comparison with the same reference levels obtained by tidal. For this purpose, the main concepts related to tidal dynamics and reference levels considered in hydrographic surveys in coastal and oceanic areas, such as: Chart Datum (CD) and Mean Sea Level (MSL) were presented. First, a preliminary methodology for obtaining the MSL from ALTSAT data from the CryoSat-2 (CS-2) mission was proposed. In addition, the evaluation was performed for MSL and its variation compared with the MSL obtained by the data from the tide gauge station in Fortaleza-CE. This methodology showed promising results. Then, the preliminary methodology was improved and its applicability was extended to tide gauge stations located along the Brazilian coast, in a nine-year time series. Finally, an innovative methodology was developed, capable of determining the CD using ALTSAT data, for stations located in Northeast Brazil. Its results were analyzed and validated from the CD defined by tide gauges. In general, for all proposed methodologies, the results were equivalent and consistent with the tide data. Therefore, it was concluded that it is possible to use data from the CS-2 mission as an alternative to the use of tide gauges, for the definition of HRL. Whereas, both the MSL and the CD, coming from the ALTSAT technique, presented values compatible with tide gauge data. Thus allowing a reduction of the costs involved in addition to the facility for updating and verifying hydrographic levels.

Keywords: ALTSAT. Tide Gauge. CryoSat-2. Hydrography.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Situações de marés de sizígia e quadratura.....	25
Figura 2 – Comportamento das marés diurna, semidiurna e mista.	26
Figura 3 – Diferentes níveis de referência hidrográficos.	31
Figura 4 – Diagrama dos níveis de uma estação maregráfica.	35
Figura 5 – Vão livre vertical sobre a água.	36

CAPÍTULO 2

Figura 1 – Princípio da Altimetria por Satélite.	47
Figura 2 – Superfícies de referência da Altimetria por Satélite.	48
Figura 3 – Localização do Porto do Macuripe e marégrafo EMFOR.	50
Figura 4 – Fluxograma da metodologia aplicada.	51
Figura 5 – Marégrafo EMFOR e as trilhas do CS-2 em um mês de dados.	52
Figura 6 – Trilhas do CS-2 e o filtro na região do marégrafo.	53
Figura 7 – Esquema de integração de maregrafia e ALTSAT.	54
Figura 8 – Comparação das variações do NMM: A) ALTSAT e maregrafia; B) Detalhe para a variação do NMM para ALTSAT.	55

CAPÍTULO 3

Figura 1 – Localização das estações maregráficas pertencentes a RMPG.....	66
Figura 2 – Fluxograma metodológico.	67
Figura 3 – Amostra das trilhas da missão CryoSat-2.	68
Figura 4 – Relação entre as superfícies de referência.	70
Figura 5 – Médias mensais para EMFOR.	72
Figura 6 – Médias mensais para EMSAL.	74
Figura 7 – Médias mensais para EMMAC.	75
Figura 8 – Médias mensais para EMIMB.	76

CAPÍTULO 4

Figura 1 – Localização das estações maregráficas do CryoSat-2.	85
Figura 2 – Fluxograma metodológico.	86
Figura 3 – Diagrama dos níveis de uma estação maregráfica.	90
Figura 4 – Valores do NR e o erro relativo para EMFOR.	94
Figura 5 – Valores do NR e o erro relativo para EMSAL.	95

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1– Principais componentes harmônicos constituintes.....28

CAPÍTULO 2

Tabela 1– Relatório do NMM para as técnicas ALTSAT e maregrafia.....56

CAPÍTULO 3

Tabela 1 – Coordenadas aproximadas das estações.....66

Tabela 2 – Resumo das estatísticas descritivas em metros.72

CAPÍTULO 4

Tabela 1 – Critério de Courtier para classificação de maré..... 89

Tabela 2 – Cota do NR referenciado ao NMM para marés semidiurnas com desigualdades.90

Tabela 3 – Amplitudes e Fator C das estações maregráficas.92

Tabela 4 – Valores do Z_0 calculado e retirados da F-41.93

Tabela 5 – Valores do NMM e constantes A e H.93

Tabela 6 – Valores do NR e o erro relativo para EMFOR.....94

Tabela 7 – Valores do NR e o erro relativo para EMSAL.95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADT – *Absolute Dynamic Topography*

AJB – Águas Jurisdicionais Brasileiras

ALTSAT – Altimetria por Satélite

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

BDG – Banco de Dados Geodésicos

BM – Baixa-Mar

BRAT – *Broadview Radar Altimetry Toolbox*

CD – *Chart Datum*

CHM – Centro de Hidrografia da Marinha

CMEMS – *Copernicus Marine and Environment Monitoring*

CNES – *Centre National d'Etudes Spatiales*

CS-2 – CryoSat-2

DCN – *Datum da Carta Náutica*

DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação

DVB – *Data Verticais Brasileiros*

EGM – *Earth Gravitational Model*

EM – Estação Maregráfica

EMFOR – Estação Maregráfica de Fortaleza-CE

EMIMB – Estação Maregráfica de Imbituba-SC

EMMAC – Estação Maregráfica de Macaé-RJ

EMSAL – Estação Maregráfica de Salvador-BA

ENC – *Electronic Navigational Chart*

ESA – *European Space Agency*

ESRI – *Environmental Systems Research Institute*

EUMETSAT – *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GPS – *Global Positioning System*

HAT – *Highest Astronomical Tide*

HyVSEPs – *Hydrographic Vertical Separation Surfaces*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IAG – *International Association of Geodesy*

ICGEM – *International Centre for Global Earth Models*),

IHO – *International Hydrographic Organization*
IHRS – *International Height Reference System*
LAT – *Lowest Astronomical Tide*
LEO – *Low Earth Orbit*
LH – *Levantamento Hidrográfico*
LRM – *Low Resolution Mode*
MDT – *Mean Dynamic Topography*
MHWN – *Mean High Water Neaps*
MHWS – *Mean High Water Springs*
MLLW – *Mean Lower Low Water*
MLWN – *Mean Low Water Neaps*
MLWS – *Mean Low Water Springs*
MSL – *Mean Sea Level*
MSS – *Mean Sea Surface*
NASA – *National Aeronautics and Space Administration*
NetCDF – *Network Common Data Form*
NLLW – *Nearly Lowest Low Water*
NMD – *Nível Médio Diário*
NML – *Nível Médio Local*
NMM – *Nível Médio do Mar*
NMR – *Nível Médio da Régua*
NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*
NORMAM – *Normas da Autoridade Marítima*
NR – *Nível de Redução*
NRH – *Níveis de Referência Hidrográficos*
PACMARE – *Previsão e Análise de Maré*
PM – *Preamar*
RMPG – *Rede Maregráfica Permanente para Geodésia*
RMS – *Root Mean Square*
RN – *Referência de Nível*
RRNN – *Referências de Nível*
RSS – *Root Sum Squared*
RTK – *Real Time Kinematic*
SAR – *Synthetic Aperture Radar*

SARIn – *SAR/Interferometric*

SIRAL – *Synthetic Interferometric Radar Altimeter*

SIRGAS – Sistema de Referência Geodésico para as Américas

SLA – *Sea Level Anomaly*

SLGO – *ST. Lawrence Global Observatory*

SSB – *Sea State Bias*

SSH – *Sea Surface Height*

SGB – Sistema Geodésico Brasileiro

TNMM – Topografia do Nível Médio do Mar

VORF – *Vertical Offshore Reference Frame*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO.....	14
2. HIPÓTESES.....	18
3. OBJETIVOS	18
4. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	19
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	20
CAPÍTULO 1. NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS: UMA ABORDAGEM DESCRITIVA	22
1. INTRODUÇÃO	22
2. DINÂMICA DAS MARÉS	24
3. NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS	29
3.1 Nível Médio do Mar (NMM) e Nível Médio do Mar Local (NML).....	32
3.2 Nível de Redução (NR).....	33
3.3 Vão Livre Vertical	36
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
CAPÍTULO 2. COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL MÉDIO DO MAR A PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES E MAREGRAFIA EM FORTALEZA – CE.....	43
1. INTRODUÇÃO	43
2. ALTIMETRIA POR SATÉLITE.....	45
2.1 Princípio da altimetria por satélite.....	45
2.2 CryoSat-2.....	48
3. MATERIAIS E MÉTODOS	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
CAPÍTULO 3. VALIDAÇÃO DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE PARA OBTENÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA COSTA BRASILEIRA	62
1. INTRODUÇÃO	62
2. MATERIAIS E MÉTODOS	66
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
CAPÍTULO 4. DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE REDUÇÃO A PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE	82
1. INTRODUÇÃO	82
2. MATERIAS E MÉTODOS	85
2.1 CryoSat-2.....	87
2.2 Maregrafia	88
2.3 Nível de Redução.....	88
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	92
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
CONCLUSÕES GERAIS	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

INTRODUÇÃO GERAL

1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO

O conhecimento dos Níveis de Referência Hidrográficos (NRH) é de grande importância para estudos sobre as mudanças no clima da Terra, consequências socioeconômicas da população que vive em regiões beira-mar, projetos e estudos costeiros, além da segurança da navegação. Os níveis hidrográficos estão associados as variações do nível do mar e podem ser obtidos por meio de metodologias clássica e moderna. Os marégrafos (de boia, pressão, digitais, radar ou laser) e réguas linimétricas, são consideradas metodologias clássicas. Medições por satélites altimétricos, dados disponíveis a partir do ano de 1990, são considerados como uma metodologia moderna (CAZENAVE; NEREM, 2004).

O marégrafo e a régua são, tradicionalmente, a principal fonte para obtenção das variações do nível do mar, além da estimativa das componentes harmônicas de maré. Estes equipamentos fornecem medições relativas da maré (em relação a costa terrestre). Podem ser afetadas pela movimentação da crosta, apresentar problemas espaciais de distribuição, ou seja, se localizam nas margens continentais e em ilhas que geralmente estão distantes entre si. Além de tudo, estão atrelados ao alto custo para sua instalação e manutenção (COELHO, 2016; MENEZES et al., 2021a).

Por sua vez, o princípio de medida da Altimetria por Satélite (ALTSAT) é baseado na emissão de pulsos de energia na frequência das micro-ondas e mede o tempo gasto em que recebe o sinal após ser refletido pela superfície do mar. Desta maneira, é capaz de fornecer medidas do nível absoluto do mar possibilitando, assim, a estimativa das marés de forma global. Apesar do ciclo de repetição dos satélites variarem por até dezenas de dias, suas observações são obtidas com alta resolução e essa viabilidade estimulou a comunidade científica em desenvolver melhorias na técnica ALTSAT, bem como na metodologia e modelagem das marés durante as últimas décadas (NEREM; MITCHUM, 2001; REIS et al., 2018).

Em locais próximos a costa e nos oceanos, as variações de fases da maré definem os principais níveis de referência para os levantamentos hidrográficos. A *International Hydrographic Organization* (IHO) especifica que é imprescindível relacionar todas as profundidades medidas, independentemente do estágio da maré ou do nível da água no

momento da sondagem, a um nível de referência hidrográfico comum. Ressalta-se que os *Data*¹ Hidrográficos diferem do *Datum Vertical* do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (MENEZES et al., 2021b).

As profundidades representadas nas cartas náuticas são sempre “reduzidas”. Isto significa dizer que as profundidades têm origem no plano de referência conhecido como Nível de Redução (NR) e não na superfície da água. O NR é um plano de referência no qual deve ser tão baixo que a maré, em condições normais, não fique abaixo dele. Desta forma, garante-se segurança para que as embarcações que trafegam naquele local, não encontrem profundidades menores do que as representadas nas cartas (MIGUENS, 1996; IHO, 2005; DHN, 2017).

A IHO preconiza uma padronização mundial ao adotar o nível *Lowest Astronomical Tide* (LAT) como padrão internacional. No entanto, muitos países utilizam como referência outros níveis de redução. O mesmo ocorre no Brasil, que se faz uso do *Mean Low Water Springs* (MLWS) como referência de NR nas cartas náuticas. Ainda que utilize o MLWS como NR, este nível não garante que não ocorra profundidades negativas, principalmente em áreas costeiras. Logo, aconselha-se calcular o NR local e atualizá-lo com frequência. (RATTON, 2022).

Baseando-se em uma análise harmônica da maré obtida a partir de observações do nível do mar com duração mínima de 32 dias, a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN) propõe determinar o NR local utilizando o Critério de Courtier (1938) e Balay (1952). Em que, basicamente, estima-se a semi-amplitude máxima da onda de maré (Z_0) e aplica-se o método classificado por Franco (2009) como uma estimativa não rigorosa do NR.

No Brasil, o Nível Médio do Mar (NMM) é utilizado para referenciar as altitudes dos pontos costeiros, conhecidas como altitudes hidrográficas, e altitude de vãos livres verticais, que são estruturas nas quais poderá ser necessário navegar sob elas, por exemplo, pontes, cabos aéreos energizados e outros (KALIL, 1999; MESQUITA, 2003).

Historicamente as variações do NMM têm sido estimadas a partir de dados de mareógrafos instalados na costa, assim como as estimativas de NR. No entanto, a necessidade de aquisição de equipamentos, definição (ou reocupação) e manutenção de bases maregráficas para levantamentos hidrográficos e/ou estudos correlacionados, pode se transformar em empecilho e dificuldade, principalmente, para pequenas empresas.

Além do NMM, a atualização dos NRs nas cartas náuticas é extremamente importante, pois a variação da altura da superfície do mar é influenciada por diversos fatores, como marés,

¹ Plural de *Datum*

correntes, ventos, pressão atmosférica e mudanças no nível do mar. Essas variações podem causar sérios problemas de segurança na navegação, como encalhe de navios e até colisões com obstáculos submersos.

Diante da dificuldade de manutenção e obtenção de longas séries de dados maregráficos, vê-se como uma excelente alternativa, o emprego de dados ALTSAT para a obtenção de informações oceânicas. Nas últimas décadas estudos vêm sendo desenvolvidos com base em dados da Altimetria por Satélite, proporcionando conhecimento em amplas áreas da ciência (DALAZOANA et al., 2005; REIS et al., 2018).

Alguns autores desenvolveram pesquisas na viabilização de metodologias e análises de dados advindos de ALTSAT com o auxílio de dados de maregrafia. Schwatke et al. (2015) realizaram comparações relativas entre as séries temporais das observações maregráficas com as séries de *Sea Surface Height* (SSH) derivadas de distintas missões altimétricas. Estes autores, indicaram que as comparações apresentaram diferenças de 4 a 36 cm para lagos e de 8 a 114 cm para rios. Idžanović, Ophaug e Andersen (2017) obtiveram valores da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM do inglês, *Mean Dynamic Topography* - MDT) a partir da missão ALTSAT CryoSat-2 com concordância de 3 a 5 cm com TNMM obtidos por satélite gravimétrico e maregrafia na Costa da Noruega.

Zaron (2018) desenvolveu e avaliou um modelo empírico para marés no Mar de Weddell, usando dados da missão CryoSat-2 comparando-o com dados do *Global Positioning System* (GPS), medições históricas de maregrafia e modelos de marés existentes. Reis et al. (2018), realizaram um estudo teórico das estimativas do NMM na costa brasileira por meio das missões altimétricas: TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2 e Jason-3.

Pajak e Kowalczyk (2019) avaliaram as amplitudes anuais e semestrais do nível do mar determinadas pelas técnicas: ALTSAT e maregrafia, na região do Mar Báltico. Verificaram que os resultados das duas técnicas estão em concordância e que as amplitudes anuais entre os dados ALTSAT e maregrafia se apresentam dentro do intervalo de 1,53 cm e 0,33 cm. Além disso, encontraram 0,92 de correlação entre as variações anuais, em ambas as técnicas.

Já na Austrália, Karimi et al. (2020) estimaram a TNMM a partir de dados do CryoSat-2 comparados com dados de maregrafia e dois modelos de TNMM globais. A $TNMM_{CryoSat-2}$ exibiu altos valores em relação aos TNMM globais, o que foi justificado devido à elevação do mar. Em relação as estações maregráficas, a $TNMM_{CryoSat-2}$ apresentou resultados semelhantes. No estudo de Azkue et al. (2021), foram utilizados dados de satélites altimétricos, constantes harmônicas e modelos globais do nível do mar para criar um modelo empírico de distâncias entre o NR e o elipsoide WGS84 em uma área onde há poucas observações do nível do mar. A

superfície resultante se mostrou adequada para o uso em mar aberto e pode ser útil para melhorar a eficiência dos levantamentos hidrográficos, auxiliar atividades marítimas e contribuir para uma navegação mais precisa em áreas críticas.

Embora as metodologias clássicas estejam consolidadas no país, Daher et al. (2015) mostraram que há uma carência de estudos sobre as marés, e estas apresentam variações consideráveis ao longo da costa brasileira. Ainda no contexto atual, fica evidente que são poucos os estudos nacionais sobre temas relacionados ao ALTSAT e Níveis de Referências Hidrográficos, o que justifica a necessidade de mais pesquisas nestes temas, aplicados à região do Brasil.

Perante o exposto, é nítida a demanda de estudos com estes conteúdos no país. Uma vez que, os níveis de referência são de extrema relevância para diversas áreas do conhecimento e sociedade. Portanto, têm-se o incentivo em desenvolver metodologias que contornem os problemas aqui apresentados, como, a dificuldade na constante atualização do NMM e NR, além da redução dos custos envolvidos.

Dessa forma, pretende-se apresentar a aplicabilidade e o desenvolvimento de métodos para a obtenção do NMM e NR, através de dados disponíveis gratuitamente provenientes da missão altimétrica CryoSat-2. Vale salientar, que ainda não foram utilizados dados ALTSAT na obtenção do NR para a costa brasileira. Neste sentido, esta pesquisa se torna pioneira na utilização destes dados em âmbito nacional. Contribuindo com diversas áreas de estudos e ciências dependentes de informações dos Níveis de Referência Hidrográficos.

2. HIPÓTESES

Diante do exposto, definem-se como hipóteses deste trabalho:

- i. É viável o desenvolvimento de uma metodologia robusta capaz de determinar o Nível Médio do Mar utilizando dados de Altimetria por Satélite, que seja compatível com as observações maregráficas;
- ii. É possível desenvolver uma metodologia para estabelecer o Nível de Redução fazendo-se uso de dados de satélites altimétricos, sendo uma alternativa à utilização de observações de estações maregráficas.

3. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral, desenvolver metodologias para obtenção e análises de Níveis de Referência Hidrográficos.

Como objetivos específicos têm-se:

- i. Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos Níveis de Referência Hidrográficos e dinâmica das marés;
- ii. Propor e avaliar uma metodologia na qual utilize dados de Altimetria por Satélite na definição do Nível Médio do Mar para uma estação maregráfica;
- iii. Aprimorar o método desenvolvido em ii, validá-lo baseando-se em observações de estações maregráficas, além de amplia-la para a costa brasileira;
- iv. Desenvolver uma metodologia para obtenção do Nível de Redução utilizando-se dados obtidos por Satélites Altimétricos.

4. ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa visa, de modo geral, desenvolver metodologias que fazem uso de dados de satélites altimétricos da missão CryoSat-2 na definição de Níveis de Referência Hidrográficos, contrapondo ao uso de marégrafos. O presente documento está dividido em seis tópicos, conforme segue:

INTRODUÇÃO GERAL – Apresenta uma introdução sobre os Níveis de Referência Hidrográficos e a tecnologia por satélites altimétricos, os objetivos gerais e específicos, justificativa e importância do presente estudo.

CAPÍTULO 1: *Níveis de Referência Hidrográficos: uma Abordagem Descritiva* – tem como objetivo apresentar os principais conceitos relacionados aos níveis de referência considerados nos estudos e levantamentos hidrográficos, além de uma breve revisão sobre a dinâmica das marés. Artigo publicado na Revista Brasileira de Cartografia, v.73, n° 3 de 2021 (MENEZES; SOUZA; FERREIRA, 2021a).

CAPÍTULO 2: *Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza – CE* – tem como objetivo propor uma metodologia para a obtenção do Nível Médio do Mar (NMM) e suas variações a partir de dados ALTSAT, da missão CryoSat-2, e dados maregráficos. Artigo publicado no Anuário do Instituto de Geociências, v.44 de 2021 (MENEZES; SOUZA; FERREIRA, 2021b).

CAPÍTULO 3: *Validação da Altimetria por Satélite para Obtenção do Nível Médio do Mar em Estações Maregráficas na Costa Brasileira* – tem como objetivo aprimorar e ampliar o método desenvolvido no capítulo 2, que possibilite determinar o NMM através de dados de satélites altimétricos validados por observações de estações maregráficas localizadas ao longo da costa brasileira.

CAPÍTULO 4: *Definição do Nível de Redução a partir da Altimetria por Satélite* – tem como objetivo desenvolver uma metodologia que permita determinar o Nível de Redução a partir de observações de satélites altimétricos, bem como sua validação e análise.

CONCLUSÕES GERAIS – expõe as conclusões gerais deste trabalho, as considerações finais e propostas para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZKUE, M. F. D.; D'ONOFRIO, E. E.; BANEGAS, L. **Development of an empirical chart datum model for a region of the Southwest Atlantic Ocean**. Ocean and Coastal Research, v. 69, 2021.
- BALAY, M.A. **La cote du plan**. Revue Hydrographic Internationale. v. 24, n. 2, p. 109, 1952.
- CAZENAVE, A.; NEREM, R. S. **Present-day sea level change: Observations and causes**. Reviews of Geophysics. v. 42, n. 3, p. 1-20. 2004. DOI: [http://dx.DOI: https://doi.org/10.1029/2003rg000139](http://dx.doi.org/10.1029/2003rg000139).
- COELHO, A. L. **Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em séries de 18,69 anos**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2016.
- COURTIER, A. **Marées**. Service Hydrographique de la Marine. 234 p, 1938.
- DAHER, V. B.; PAES, R. C. O. V.; FRANÇA, G. B.; ALVARENGA, J. B. R.; TEIXEIRA, G. L. G. **Extraction of Tide Constituents by Harmonic Analysis Using Altimetry Satellite Data in the Brazilian Coast**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. v. 32, p. 614–626, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-14-00091.1>
- DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C. **Estudos do MSL a partir de séries temporais maregráficas e de Altimetria por Satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS**. Revista Brasileira de Cartografia, n. 57/02. p. 140-153, 2005.
- DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (2º revisão)**. Marinha do Brasil, Brasil, 94 p., 2017.
- FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2º edição, 344p. Niterói, 2009.
- IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE**. Geophysical Research Letters, v. 44, p. 5609–5617, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL073777>.
- IHO – International Hydrographic Organization. **C-13: IHO Manual on Hydrography**. Mônaco, International Hydrographic Bureau, 540 p., 2005.
- KALIL, A. F. D. **Contribuições ao estudo do Nível Médio do Mar no Estado do Rio de Janeiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1999.
- KARIMI, A. A.; ANDERSEN, O. B.; DENG, D. **Mean Sea Surface and Mean Dynamic Topography Determination from Cryosat-2 Data around Australia**. Advances in Space Research, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.009>

MENEZES, R. R. V.; SOUZA, L. M.; FERREIRA, I. O. **Níveis de Referência Hidrográfico: uma Abordagem Descritiva**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 73 n. 3, p 827-841, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n3-56990>.

MENEZES, R. R. V.; SOUZA, L. M.; FERREIRA, I. O. **Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza – CE**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 44, 2021b. DOI: https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35347.

MESQUITA, A. R. **Sea Level Variations Along the Brazilian Coast: A Short Review**. Journal of Coastal Research, v. 35, p. 21-31, 2003.

MIGUENS, A. P. **Navegação: a Ciência e a Arte. Volume I - Navegação costeira, estimada e em águas restritas**. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Rio de Janeiro. 1996.

NEREM, R. S.; MITCHUM, G. T. **Sea level change**. In: FU, L.; CAZENAVE, A (ed). Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications. p. 329–349, 2001. ISBN 0122695453.

PAJAK, K.; KOWALCZYK, K. A. **Comparison of Seasonal Variations of Sea Level in the Southern Baltic Sea from Altimetry and Tide Gauge Data**. Advances in Space Research, v. 63, n. 5, p. 1768-1780, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.11.022>.

RATTON, E. **A importância da atualização dos Níveis de Redução para a segurança da navegação em hidrovias. Diálogos Hidroviáveis**. Programa de integração permanente de iniciativas para o desenvolvimento sustentável das hidrovias brasileiras. Alfenas-MG, 2022.

REIS, V. P.; PALMEIRO, A. S.; BARBOSA, L. G. **Estudo da obtenção do Nível Médio do Mar com altimetria por satélites**. Revista Brasileira de Geomática. v. 6, n.1, p. 3-22, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.3895/rbgeo.v6n1.5518>.

SCHWATKE, C.; DETTMERING, D.; BOSCH, W.; SEITZ, F. **DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry**. Hydrology and Earth System Sciences. v. 19, n. 10, p. 4345-4364, 2015.

ZARON, E. D. **Ocean and Ice Shelf Tides from CryoSat-2 Altimetry**. Journal of Physical Oceanography, v. 48, n. 4, p 975-993, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0247.1>

CAPÍTULO 1. NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS: UMA ABORDAGEM DESCRITIVA

Resumo

A execução de um Levantamento Hidrográfico (LH) é um processo contínuo, desde seu reconhecimento até à validação dos resultados nos quais todas as partes envolvidas efetuam um trabalho minucioso. Para tal, é importante ser detentor de conhecimento específico das normas, metodologias e tecnologias utilizadas na hidrografia. Contudo, principalmente no Brasil, o conhecimento, a prática e a literatura acerca de levantamentos hidrográficos ainda atingem menores proporções do que se espera de um país com dimensões continentais e extenso em litoral. A *International Hydrographic Organization* (IHO) especifica que, para um LH é necessário relacionar todas as profundidades medidas, independentemente do estágio da maré ou do nível da água no momento da sondagem, a um determinado nível de referência hidrográfico. Dentro deste contexto, o objetivo deste capítulo é apresentar os principais conceitos relacionados aos níveis de referência considerados nos estudos e os levantamentos hidrográficos em áreas costeiras e oceânicas. Realizou-se um levantamento bibliográfico a partir de literaturas de apoio, principalmente internacionais, relacionadas a levantamentos hidrográficos, sua caracterização e metodologias, os quais serviram de apoio aos conceitos aqui apresentados.

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente dois terços da superfície terrestre é coberta por água na forma de oceanos, mares, rios, lagoas, reservatórios, entre outros. Muitas atividades de campo são desenvolvidas nesses ambientes e podem exigir conhecimento prévio das condições do ambiente submerso (GAGG, 2016). Neste sentido, o levantamento hidrográfico, segundo a IHO (2005), contempla informações acerca da batimetria (profundidade), da natureza e geomorfologia do fundo marinho, gravidade, direção e força das correntes oceânicas, altura e fase da maré, magnetismo terrestre, além de determinação das propriedades químicas e físicas da água, com a fundamental finalidade em compilar dados para a geração de cartas náuticas confiáveis.

De acordo com a Portaria Normativa nº 452 (BRASIL, 2007) os LHs realizados em Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB) são especificados pela Marinha do Brasil. A qual é

responsável pelo estabelecimento de normas, procedimentos para autorização e controle de levantamentos hidrográficos executados por órgãos ou entidades, sendo definidas, pelas denominadas Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (NORMAM-25) (DHN, 2017). Essas normas são baseadas nos padrões internacionais que são ditadas pela Organização Hidrográfica Internacional (do inglês, *International Hydrographic Organization* - IHO). A NORMAM-25 classifica os levantamentos hidrográficos em duas categorias ALFA (A) e BRAVO (B). A Categoria A, instruí que os levantamentos hidrográficos devem cumprir integralmente as especificações técnicas, além de serem capazes de fornecer dados que sirvam para a atualização de cartas náuticas ou para as demais finalidades descritas no item 0206 da NORMAM-25. Já a Categoria B, é destinado a execução de levantamentos hidrográficos sem o propósito de atualização de cartas náuticas (DHN, 2017).

A Marinha do Brasil também é responsável pela produção, atualização e distribuição das Cartas Náuticas em papel, Cartas *Raster* e Cartas Náuticas Eletrônicas (do inglês, *Electronic Navigational Chart* - ENC), por meio da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e do Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) (CHM, 2020).

De acordo com a IHO (2005), a carta náutica é um documento cartográfico, decorrente de um LH, proposto para representar a área navegável, fornecendo informações sobre profundidades, natureza do fundo, fundeadouros e áreas de fundeio, perigos à navegação (bancos, pedras submersas, cascos soçobrados, etc.), auxílios à navegação (faróis, faroletes, boias, balizas, luzes de alinhamento, radiofaróis, etc.), altitudes e pontos notáveis aos navegantes, linha de costa e de contorno das ilhas, elementos de marés, correntes e magnetismo. Além dos seus elementos básicos, a carta náutica é um documento de trabalho usado pelo navegador como um mapa das vias hidrográficas e constitui uma ferramenta de trabalho essencial para a segurança da navegação (MANDARINO; NETO; FOLLY, 2018).

No Brasil, as cartas náuticas não utilizam o mesmo referencial altimétrico das cartas terrestres, uma vez que os dados batimétricos precisam estar relacionados com os efeitos da maré local para permitir uma navegação segura na região. Recomenda-se que o marégrafo esteja referenciado a pelo menos um ponto de referência de nível terrestre. Permitindo-se assim, a integração de referenciais altimétricos terrestres, marítimos e geodésicos nas estações maregráficas (WELLS; KLEUSBERS; VANICEK, 1996; IHO, 2018).

O referencial vertical das profundidades representadas em uma carta náutica é denominado Nível de Redução (NR). Consiste num plano de referência que deverá retratar as profundidades mínimas a serem encontradas na região, a fim de eliminar as variações das marés

e garantir ao navegante que este, preferencialmente, não encontre profundidade menor do que as representadas na carta náutica (IHO, 2005; FIG, 2006; FRANCO, 2009).

Dentro deste contexto, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica, a fim de unir informações pertinentes sobre os principais NRH aplicados às áreas costeiras e oceânicas, retratando como estes conceitos e metodologias são importantes para os levantamentos hidrográficos, obras costeiras e outras áreas da ciência. A principal motivação desta revisão se deu para suprir o déficit observado em literaturas brasileiras sobre o assunto, além de incentivar mais pesquisas nesta temática.

2. DINÂMICA DAS MARÉS

Segundo IHO (2019), maré é a oscilação periódica vertical da superfície do oceano ou outra grande massa d'água sobre a Terra, resultante da atração gravitacional da Lua e do Sol, em menor proporção.

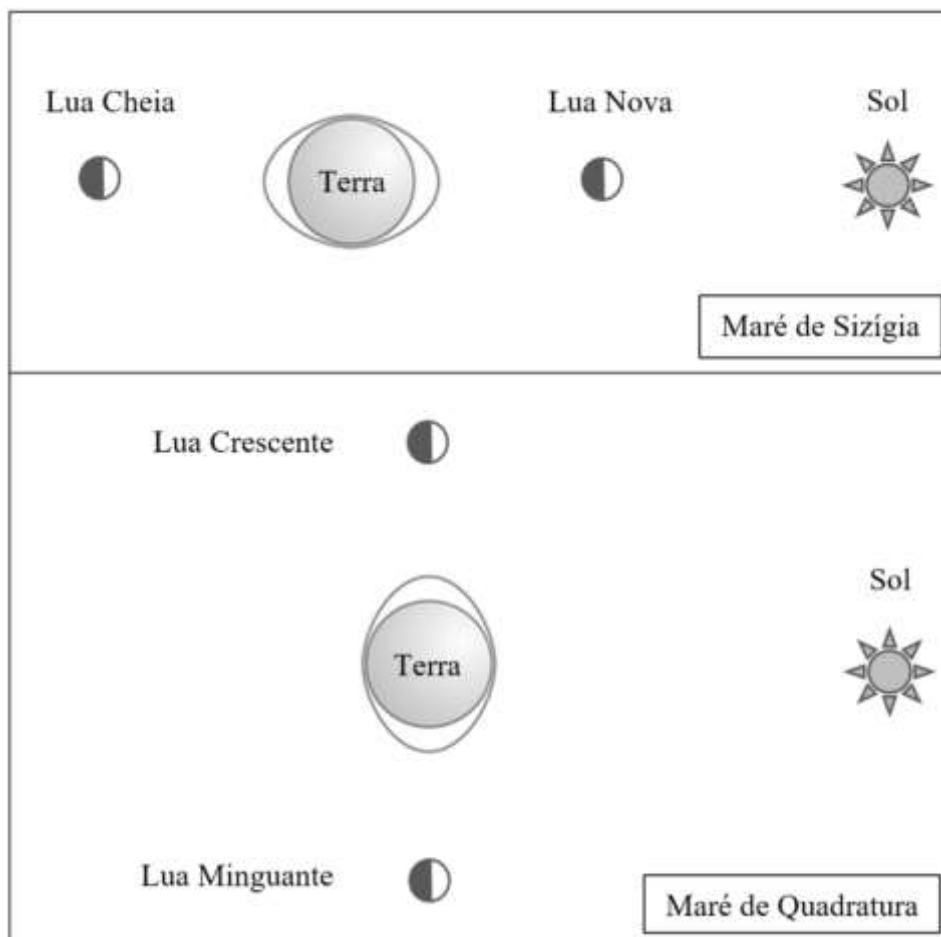
As forças geradoras de maré são causadas pela combinação das forças de atração gravitacionais e das forças centrífugas entre a Terra, o Sol e principalmente a Lua. A magnitude das forças centrífugas do sistema, Sol-Terra-Lua, será dependente de muitos fatores, tais como a topografia da plataforma continental. Além disso, a Lei da Gravitação Universal de Newton implica que as matérias se atraem diretamente proporcional a suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que as separa (HENDERSHOTT; MUNK, 1970).

A força gravitacional entre a Terra e a Lua depende da posição da Lua em relação à Terra, logo a resultante entre ambas as forças gera as marés (QUINN; ATKINSON; WELLS, 2012). Consequentemente, as resultantes dessas forças causam níveis de água maiores que o normal, nos pontos onde a superfície da Terra está mais próxima da Lua e níveis menores nos pontos mais afastados, representadas respectivamente pelas marés de sizígia e de quadratura (BOON, 2013).

Marés de sizígia ocorrem quando a Lua e o Sol estão em um mesmo alinhamento, produzindo as maiores amplitudes de maré, ou seja, seus efeitos são aditivos. Esta situação ocorre na Lua Nova, quando o Sol e a Lua estão em conjunção, ou Lua Cheia quando estão em oposição. Por sua vez, as marés de quadratura ocorrem nas situações de Lua Crescente e Minguante, quando a posição da Lua e do Sol estão defasadas em um ângulo de aproximadamente 90° , gerando as menores amplitudes de maré. Logo, a variação da maré máxima e mínima ocorrem, aproximadamente, em períodos de 14 dias. (ANTUNES, 2000;

WHITE, 2017). A relação das marés com as fases da Lua, representadas pelas posições relativas da Terra, da Lua e do Sol podem ser visualizadas na Figura 1.

Figura 1 – Situações de marés de sizígia e quadratura.



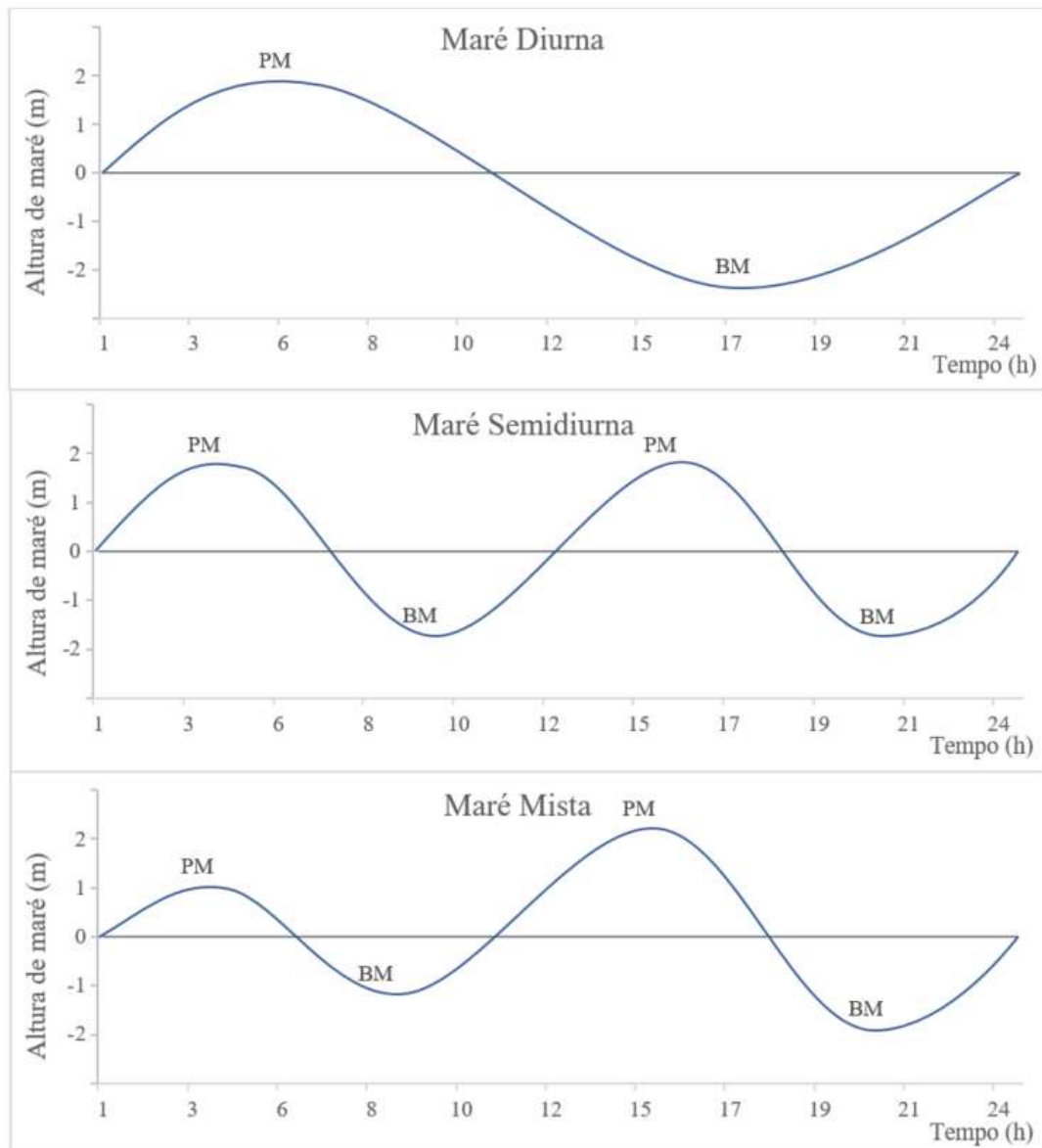
Fonte: Adaptado de Antunes (2000).

O período das fases da Lua, chamado de mês sinódico ou lunação, é o período médio em que a Lua completa uma revolução em relação à linha que une o Sol e a Terra e é aproximadamente 29,5 dias. Um dia lunar é o tempo em que a Terra rotaciona em torno do seu eixo em relação à Lua, resultando em uma revolução a cada 24 horas e 50 minutos. Também é conhecido como dia de maré, por ser a principal causa da ocorrência de variações diárias da maré (FRANCO, 2009; WHITE, 2017).

Durante um dia lunar, uma Preamar (PM) é identificada quando o nível de água atinge uma elevação máxima e uma Baixa-Mar (BM) quando ocorre um valor mínimo. O intervalo entre sucessivas PM e BM é cerca de 12 horas e 25 minutos (equivalente à metade de um dia médio lunar), logo em muitos locais o horário das marés mínimas e máximas ocorrem quase uma hora depois em dias consecutivos (FRANCO, 2009; WHITE, 2017).

Das principais características das marés, a classificação do tipo de maré é fundamental, principalmente, para definir o NR. O tipo de maré refere-se às características entre uma BM e uma PM de um determinado local. Estas características podem ser agrupadas em três classes ou tipos; maré semidiurna, diurna e mista (FRANCO, 2009). A Figura 2 ilustra o comportamento da altura em relação ao tempo dos três tipos de marés.

Figura 2 – Comportamento das marés diurna, semidiurna e mista.



Fonte: Adaptado de IHO (2005).

No período de um dia lunar (24h50min) o padrão da maré geralmente é a ocorrência de duas BM e duas PM igualmente espaçadas no tempo. Este padrão é chamado maré semidiurna, sendo ínfima a variação entre as alturas das duas BM e duas PM. A maré diurna é caracterizada por apresentar apenas uma BM e uma PM, a cada dia lunar. Nesse tipo de maré, o período da

subida e da queda da maré é de aproximadamente 12 horas, em oposição aos períodos de 6 horas das marés semidiurnas. Quando ocorrem duas BM e duas PM com uma grande variação entre as alturas sucessivas, considera-se como maré mista. Chama-se de maré mista por possuir características mescladas de marés semidiurna e diurna (IHO, 2005).

A oscilação da maré muda de local para local devido aos efeitos dos continentes, das ilhas, da topografia do fundo, da variação nas órbitas da Lua e do Sol em relação ao Equador e dos efeitos meteorológicos. De acordo com Neto, Saavedra e Ribeiro (2015), de uma forma geral as marés no Brasil têm comportamento semidiurno desde Vitória, no Espírito Santo, até o litoral Norte do país. A região Sul apresenta o mesmo comportamento, no entanto sofre com influências de maré de origem não-astronômica (MELO FILHO, 2017).

A maré de origem não-astronômica pode ser brevemente definida como a diferença negativa ou positiva entre a maré observada e a maré prevista (astronômica). Esta diferença está associada a efeitos da atmosfera sobre o mar, como, a variação de pressão atmosférica, dentre outros (VEDANA; PAIOTTI DO CANTO; SCHVAMBACH, 2021). Mais detalhes podem ser vistos em Mesquita, Franco e Harari (1986) e Melo Filho (2017).

Outro ciclo lunar relevante, é a precessão da órbita lunar ou ciclo nodal lunar. Nesta circunstância, a inclinação da órbita da Lua em relação ao plano equatorial varia de $18,4^\circ$ a $28,6^\circ$ em um período de 18,61 anos, ou seja, o polo da órbita lunar executa uma revolução completa em torno do polo da eclíptica neste período, ou seja, o plano da órbita da Lua fica na mesma posição em relação a linha do Equador a cada 18,61 anos. Assim, os padrões de maré se repetem a cada ciclo nodal lunar (PUGH, 1987). Apesar deste padrão resultar em lentas variações ao longo do tempo, é importante considerá-los em certas determinações de dados maregráficos, principalmente nas previsões de marés.

As previsões de maré podem ser obtidas a partir do resultado da análise harmônica de observações maregráficas. A análise das marés, tem como objetivo reproduzir parâmetros significativos, estáveis no tempo, que descrevem o regime das marés em relação a interação entre a Terra, Sol e a Lua no local da observação. Os parâmetros são frequentemente denominados componentes harmônicos, ou de maré, e estão relacionados fisicamente ao processo de geração das marés, além de considerar uma estabilidade de característica regional. Desta forma, pressupõe-se que a partir de uma série suficientemente longa de leituras maregráficas (>18,61 anos), é possível definir um valor verdadeiro para cada constante. Na prática, as medições se estendem por períodos finitos, geralmente um ano, um mês ou até alguns dias, e os resultados da análise harmônica dos dados acabam produzindo componentes

aproximadas do valor verdadeiro. Logo, quanto maior o período de dados disponível para análise, melhor será a abordagem desses valores reais (PUGH, 2001).

De acordo com Pugh (2004), a lista dos componentes harmônicos é longa, chegando a centenas de componentes. Contudo, na prática poucos componentes são predominantes e suficientes para o cálculo das previsões. A lista dos principais componentes constituintes é apresentada na Tabela 1 e estão separados conforme seu período de influência: longo período (>24h solares); diurna (~24h solares) e semidiurna (~12h solares).

Tabela 1– Principais componentes harmônicos constituintes.

Tipo	Componente	Símbolo	Período (h)
Semidiurno	Principal Lunar	M2	12,42
	Principal Solar	S2	12,00
	Maior elíptico Lunar	N2	12,66
	Menor elíptico Lunar	L2	12,19
	Luni-Solar semidiurno	K2	11,97
	Maior elíptico Solar	T2	12,01
Diurno	Luni-Solar diurno	K1	23,93
	Principal Lunar	O1	25,82
	Principal Solar	P1	24,07
	Maior elíptico Lunar	Q1	26,87
	Pequeno elíptico Lunar	J1	23,10
	Menor elíptico Lunar	M1	24,84
Longo Período	Lunar semimensal	Mf	327,85
	Lunar mensal	Mm	661,31
	Solar anual	Sa	8765,76
	Solar semi-anual	Ssa	4383,05

Fonte: Adaptado de PUGH (2004).

A análise harmônica além de considerar os principais componentes harmônicos requer também o conhecimento da amplitude do potencial astronômico, a velocidade angular e a fase de todas as ondas consideradas na análise (MADAH, 2020). Maiores informações sobre análises harmônicas e previsão de maré podem ser encontradas em Doodson (1921), Godin (1972), Pugh (1987) e Franco (2009).

Além das componentes astronômicas representadas pela influência do Sol e Lua nas marés, é importante ressaltar que os elementos e fenômenos meteorológicos, tais como, a temperatura e a pressão atmosférica, a direção e intensidade dos ventos e a passagem de frentes frias afetam diretamente a dinâmica das ondas. Conseqüentemente, ela também sofre influência

da profundidade do leito, principalmente nas águas rasas ou de menor profundidade (LIMA, 2002).

Nos últimos anos muito têm-se notado os fenômenos de “ressacas” em certas localizações do litoral brasileiro, e elas correspondem a ondas com elevadas alturas e em grandes períodos. Diante desses possíveis fenômenos que assolam o litoral, também se faz necessário para a hidrografia o estudo do atrito das ondas com o leito e suas consequências (ressonâncias, seiches, entre outros), além de pesquisas que conduzem ao estabelecimento do Nível Médio do Mar (NMM) em qualquer localidade (LIMA, 2002).

3. NÍVEIS DE REFERÊNCIA HIDROGRÁFICOS

A IHO (2019) especifica que, para um levantamento hidrográfico é necessário relacionar todas as profundidades medidas, independentemente do estágio da maré ou do nível da água no momento da sondagem, a um nível de referência hidrográfico comum ou *Datum* da Carta Náutica (DCN). No Brasil, o DCN é conhecido como Nível de Redução (NR).

Os Níveis de Referência Hidrográficos (NRH) são materializados a partir de constantes harmônicas definidas pela análise de uma série temporal de observações, coletadas numa estação maregráfica específica na costa. Ressalta-se que os NRH, baseados nos níveis de maré, não são superfícies de referência globalmente uniformes, pois variam de local para local. Desta maneira, são estabelecidos com base em medições locais do nível da água nas diversas fases da maré (FIG, 2006).

Devido principalmente ao avanço tecnológico do *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), da altimetria e gravimetria por satélites, atualmente é possível referenciar dados batimétricos a superfícies contínuas, como, o elipsoide. Uma superfície de referência consistente e estável, para definir um *Datum* hidrográfico, possibilita um melhor monitoramento da batimetria, rotas marinhas, além da facilidade na transformação entre *Data* verticais nacionais (WELLS; KLEUSBERS; VANICEK, 1996). Atualmente existem diversos projetos que tem por finalidade conhecer e definir modelos de separação vertical entre as superfícies de referências hidrográficas, como: o BATHYELLI da França; *Vertical Offshore Reference Frame* (VORF) do Reino Unido; *Hydrographic Vertical Separation Surfaces* (HyVSEPs) do Canadá; dentre outros. Para maiores informações acerca destes e demais projetos pode-se consultar Robin et al. (2016) e Rahman e Din, (2020). A Figura 3 ilustra os NRH tradicionais.

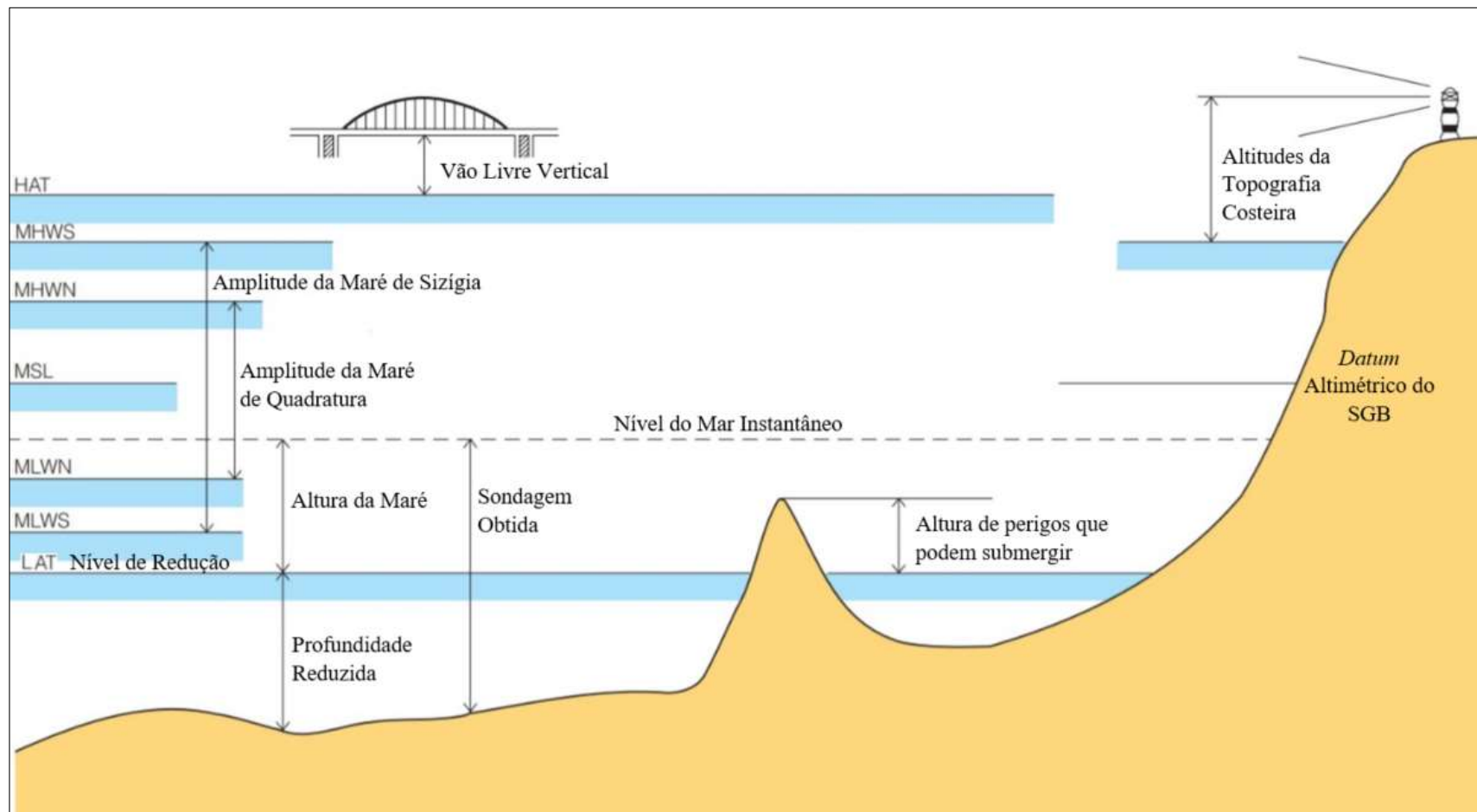
As marés de sizígia definem o *Mean High Water Springs* (MHWS) e o *Mean Low Water Springs* (MLWS). O MHWS é a média de observações das alturas das preamares de sizígia e o MLWS é a média de observações das alturas das baixa-mares de sizígia. Por sua vez, as marés de quadratura definem o *Mean High Water Neaps* (MHWN), que é a média de observações das alturas das preamares de quadratura, e o *Mean Low Water Neaps* (MLWN) o qual é a média de observações das alturas das baixa-mares de quadratura (WHITE, 2017).

As superfícies definidas pelo *Highest Astronomical Tide* (HAT) e *Lowest Astronomical Tide* (LAT) são considerados os níveis preditos extremos, ou seja, são os maiores e menores níveis previstos para ocorrer sob qualquer combinação astronômica e sob condições meteorológicas médias. Ambos são determinados para um local específico e recomenda-se que seja calculado para um período mínimo de 19 anos utilizando as constantes harmônicas derivadas de um período mínimo de 1 ano (IHO, 2005; 2010).

O *Mean Sea Level* (MSL), em português Nível Médio do Mar (NMM), é a média das alturas da superfície do mar em relação a uma superfície terrestre de referência. O nível do mar é registrado por um marégrafo, relacionado a uma régua de marés (IHO, 2018). Este nível abrange diversas proposições e finalidades que serão detalhadas no próximo tópico.

Destaque deve ser dado aos NRH, que apresentam variações espaciais e temporais em relação aos *Data* verticais terrestres, níveis zero, o mesmo ocorre com os *Data Verticais Brasileiros* (DVB). Isso ocorre devido ao fato de que os NRH são determinações de mínimo, máximo e médio local definidos durante diferentes períodos. Já o DVB, do SGB, tem como referência para a componente vertical o NMM originalmente obtido por observações de séries temporais das alturas das marés tomadas na baía de Imbituba (no litoral de Santa Catarina, entre os anos de 1949 e 1957) e no Porto de Santana (no estado do Amapá, a partir de observações em 1957 e 1958). Logo, os NRH não estão correlacionados aos *Data Verticais* do SGB (IBGE, 2009). Maiores informações sobre a relação dos DVB e NRH no litoral brasileiro podem ser consultadas em IBGE (2009; 2013).

Figura 3 – Diferentes níveis de referência hidrográficos.



Fonte: Adaptado de IHO (2018).

3.1 Nível Médio do Mar (NMM) e Nível Médio do Mar Local (NML)

Acreditava-se que o mar oscilava em torno de um nível médio estacionário, isto é, que o Nível Médio do Mar era estático (VALENTIM, 2012). No entanto, hoje em dia sabe-se que o nível do mar apresenta flutuações em escalas de tempo, estando sujeito a várias forças, como, as astronômicas, ventos, ondas, deflúvios, precipitações, evaporação, temperatura, salinidade, correntes marítimas, geotectonismo, ação antrópica e pressão atmosférica (MENEZES, 2007).

MSL é o acrônimo utilizado na literatura inglesa para representar o Nível Médio do Mar (NMM), que na literatura brasileira é encontrado, principalmente, como NMM e Nível Médio do mar Local (NML). O NML também pode ser chamado de Nível Médio da Régua (NMR) quando este está relacionado ao zero da régua. Embora sejam diferentes acrônimos, todos expressam a média de leituras do nível do mar tradicionalmente obtidas por marégrafos ou régua linimétricas, de um determinado local em um período que registre séries históricas. Além de serem correspondentes, suas respectivas séries temporais são informações relevantes para a definição do *Datum* Vertical.

Neste sentido, navegantes e hidrógrafos utilizam o termo NML, não somente por corresponder a um dos Níveis de Referência Hidrográficos, mas por retratar a maré localmente, o que é importante nas áreas costeiras. Como previamente citado, a maré varia de um local a outro e é de extrema valia o conhecimento destas oscilações para a segurança da costa e da navegação. Já o NMM é comumente aplicado ao referenciar diretamente a um nível vertical terrestre, ou seja, um *Datum* geodésico como uma superfície de elevação de nível zero, a qual as alturas dos acidentes topográficos, das curvas de nível, mapas e plantas podem ser referenciadas. No entanto, é importante ressaltar que além dos efeitos da maré, as influências meteorológicas nas estimativas do NMM são expressas por meio do Nível Médio Diário (NMD). Este corresponde a uma escala temporal de 24 hs nas estimativas do nível do mar e para a determinação do mesmo não se deve considerar os fenômenos atmosféricos e/ou meteorológicos de período inferior à escala escolhida (SILVA; FREIRE, E.; CRISÓSTOMO, 2014).

A geodésia clássica considerava o NMM, livre de perturbações, como referência teórica que melhor se ajustava ao geoide e assim eram tomados como referenciais verticais terrestres. No entanto, em uma definição atualizada o geoide é considerado uma superfície equipotencial do campo da gravidade global, representado por um valor de referência vertical geopotencial

(W_0). Seu cálculo é fundamentado em modelos de superfícies do mar e no modelo mais recente do campo da gravidade em caráter global (IAG, 2015; SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

Com o propósito de definir e realizar um sistema único de altitudes, em 2015, a *International Association of Geodesy* (IAG) convencionou W_0 em 62.636.853,4 m²s⁻², como o valor do potencial do nível de referencial vertical para o Sistema de Referência Internacional de Altitudes (do inglês, *International Height Reference System – IHRS*) (IAG, 2015; SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017).

Atualmente, é considerado que existe uma separação entre o NMM e o geoide global, denominada de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM, do inglês, *Mean Dynamic Topography - MDT*) (REIS; PALMEIRO; BARBOSA, 2018). A TNMM é uma superfície dinâmica e seu valor médio associado depende do período de avaliação, e pode atingir ± 2 m em relação ao geoide global (FU; CAZENAVE, 2001).

A variação da TNMM faz com que os diferentes níveis da maré presentes ao longo da costa do Brasil não representam a mesma superfície equipotencial. Assim, não se pode usar os diferentes NMM ao longo da costa como inunção para uma rede altimétrica. Devido a este fato, a maioria da rede vertical brasileira está referenciada ao NMM observada em Imbituba – SC, sendo que a propagação de erros aumenta conforme as Referências de Níveis (RRNN) se afastam do *Datum* (SILVA; FREITAS; DALAZONA, 2016). Mais informações sobre as variações da TNMM podem ser consultadas nos trabalhos de Seeber (2003), Freitas et al. (2007), Huang (2017), Idžanović, Ophaug e Andersen. (2017), Silva e Guimarães (2018) e Silva e Freitas (2019).

3.2 Nível de Redução (NR)

Nos levantamentos hidrográficos, as profundidades que são obtidas incluem a variação do nível das águas, as quais diferem de uma região para outra. Esta variação pode ser resultante da influência das marés ou em decorrência dos períodos de cheias e vazantes de rios. Com o intuito de eliminar esses efeitos, define-se uma superfície de referência em que todas as profundidades sondadas sejam relacionadas a um determinado nível de maré. Segundo a IHO (2005), um plano de referência para a navegação deve ser tão baixo que a maré, em condições normais, não fique abaixo dele. Este plano de referência é denominado Nível de Redução (NR).

As profundidades presentes nas cartas náuticas, estão referenciadas a um NR a fim de suprimir as variações das marés e garantir segurança para que as embarcações, que trafegam naquele local, não encontrem profundidades menores do que as representadas nas cartas. Este

mesmo nível também é utilizado na elaboração das tábuas de maré, que informam a previsão dos níveis de PM e BM de um local diariamente (MIGUENS, 1996).

O NR não é uma superfície de referência uniforme, pois quando estabelecido com base em leituras maregráficas do nível da água, estas variam de local para local. Além disso, as oscilações nos locais dos maregrafos podem não representar a variação das condições hidrodinâmicas que afetam significativamente a amplitude, a fase ou a curva de marés na área da sondagem (muitas vezes, afastadas da costa), ocasionando assim os erros cotidianos (FIG, 2014). Estes, são os principais responsáveis por inconsistências em um LH, sobretudo ao uso de uma única estação maregráfica.

Com o intuito de contornar este problema, a DHN sugere realizar um zoneamento geográfico de redução de maré, ou simplesmente, zoneamento de maré. Esta metodologia consiste em interpolar linearmente zonas de marés entre duas ou mais estações maregráficas de forma a evitar inconsistências entre os diferentes níveis de redução na área do LH. Esta metodologia deverá ser aplicada somente onde as influências externas, como, maré, vento, pressão e outras, mantenham suas características constantes nas áreas subdivididas ao longo da área do LH. Maiores informações acerca da metodologia supracitada podem ser consultadas na NORMAM 25 e no site da DHN (DHN, 2017).

Encontra-se na literatura outras metodologias com a finalidade de reduzir os erros cotidianos, como, a utilização de modelagem hidrodinâmica no estuário do Amazonas (ARENTZ, 2009), a técnica de interpolação por krigagem bayesiana empírica, nas baías de Buenaventura e Málaga (MACHUCA et al., 2018) e a redução de sondagem a partir da técnica *Real Time Kinematic* (RTK), na baía de Guanabara, descrita por Ramos (2007).

Existem vários planos para determinação do NR. Desta forma, para as áreas sujeitas a ação de maré oceânica, o IHO propõe a utilização do LAT ou um nível equivalente próximo, caso seja observado níveis mais baixos do que a LAT, para definição padrão do NR (IHO, 2005).

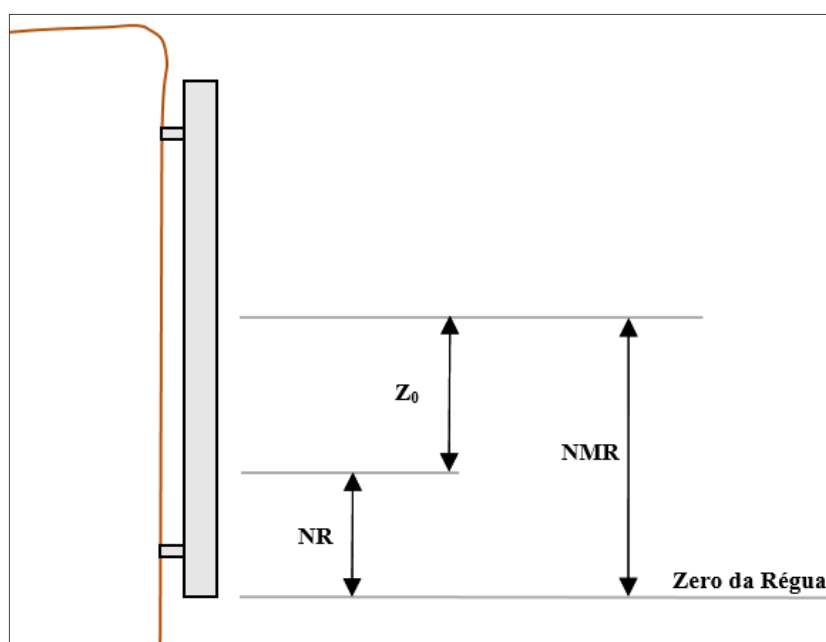
Entretanto, muitos países utilizam outros níveis de redução. Por exemplo, os Estados Unidos da América (EUA) utilizam o *Mean Lower Low Waterv* (MLLW) e o Japão o *Nearly Lowest Low Water* (NLLW) (FIG, 2006). No Brasil, a DHN emprega como NR das cartas náuticas de áreas marítimas da costa brasileira o plano aproximadamente correspondente à média das baixa-mares de sizígia (MLWS), pois se utiliza as principais constantes harmônicas, e para os rios adota-se a média das mínimas excepcionais (FERREIRA, 2013).

Soares et al. (2018) apresentam o interesse na integração dos sistemas altimétricos e níveis hidrográficos, no Brasil, por meio de um projeto estratégico do IBGE e instituições

parceiras. Empenho que se respalda nas recomendações da IHO em ter os NRH conectados ao *Datum* de referência das altitudes terrestres (IHO, 2008). Maiores detalhes sobre a integração de referenciais altimétricos terrestre e oceânico, pode ser consultado em Santana e Dalazona (2020).

A DHN determina o NR a partir de observações maregráficas com duração mínima de 32 dias, sendo recomendável 1 ano. Estas observações fomentam a identificação das constantes harmônicas, da maré local, a partir da análise harmônica referente ao período temporal observado. Baseado no somatório das amplitudes das principais componentes harmônicas, segundo a classificação das marés pelo critério de Courtier (1938) e Balay (1952), estima-se a semi-amplitude máxima da maré (Z_0). A cota Z_0 representa o nível que se encontra o NR sob o NMR. Ressalta-se, que o NR é definido por critérios puramente astronômicos da maré local e este será sempre referido a um NMR. Além disso, tanto o NR quanto o NMR devem ser cotados a partir do zero da régua maregráfica (origem das observações maregráficas) (DHN, 2017), conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Diagrama dos níveis de uma estação maregráfica.



Fonte: Autora.

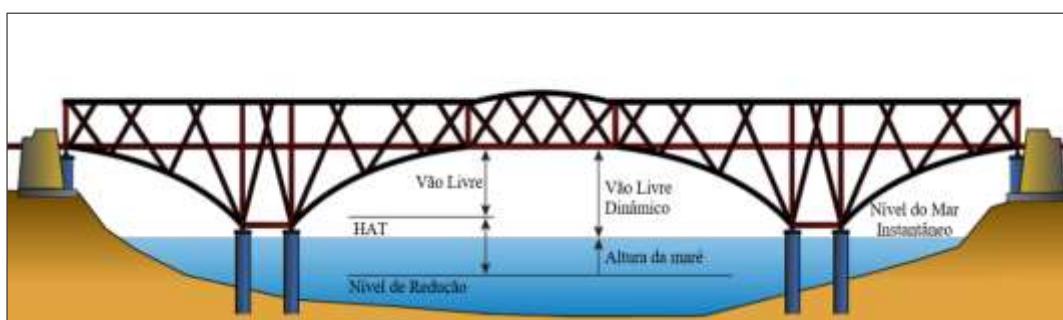
Detalhes da metodologia proposta, pela DHN, para o cálculo do NR, bem como para ocupação de novas estações maregráficas e demais cálculos necessários podem ser encontrados na NORMAM-25 e no site da DHN (DHN, 2017).

3.3 Vão Livre Vertical

Alturas verticais, consideradas pela navegação marítima, são as medidas de características acima do nível da água. Podem ser divididas em dois grupos gerais: alturas de objetos que não se tem o interesse em passar por baixo, como, montanhas, faróis, etc. e; altura dos vãos livres verticais de estruturas nas quais poderá ser necessário passar sob as mesmas, por exemplo, pontes, cabos aéreos energizados e outros (IHO, 2018).

Vão livre vertical é definido pela IHO (2010) como sendo a altura acima de um nível de referência vertical em que os pontos mais altos de um navio possam passar sob uma estrutura suspensa em segurança, ou seja, é o espaço vertical, sem obstrução física à navegação, entre a parte inferior da estrutura e a maior lâmina d'água prevista para o local (Figura 5).

Figura 5 – Vão livre vertical sobre a água.



Fonte: Adaptado de SLGO (2020).

O nível de controle vertical para as alturas dos vãos livres, considerado pela IHO, é preferencialmente o plano definido pelo HAT. Este pode ser considerado o nível de maré mais alto previsto para ocorrer sob quaisquer condições meteorológicas médias e astronômicas. Alternativamente pode-se considerar o MHWS como referencial secundário ou outras referências de níveis que melhor representem as preamares específicas do local, estabelecidos por políticas governamentais locais. Em regiões onde a diferença das marés é insignificante (aproximadamente menor que 30 cm) ou nula, pode-se referir à altura dos vãos livres e outras informações de navegação ao NML ou a algum nível aceitável para os serviços hidrográficos (ANTUNES, 2000; IHO, 2018).

A DHN utiliza em suas cartas náuticas a altura dos vãos livres referenciadas ao NML e apresenta em algarismos inteiros o valor referente ao vão livre do obstáculo na própria carta. Se faz necessário verificar a altura da maré no horário e no local da estrutura, a fim de calcular, a partir do NML, se o valor do vão livre obtido naquele horário de maré permitirá uma travessia segura. Alguns navegantes utilizam o termo “calado aéreo” para representar a parte da

embarcação que fica fora da água, ou seja, a parte da altura da embarcação que é considerada no cálculo da travessia dos vãos livres.

Em algumas estruturas específicas, como a ponte Presidente Costa e Silva (Rio-Niterói), na qual tem várias alturas de vãos livres a DHN expõe, geralmente atrás da carta náutica, informações detalhadas acerca das alturas dos vãos navegáveis e demais informações e segurança da área. Os navegantes podem consultar o NML e a previsão de maré local no livro Tábua das Marés – Almirante Franco (FRANCO, 2009).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um levantamento hidrográfico tem como finalidade primária a cartografia náutica, porém pode ser realizado para suportar uma variedade de atividades: mapeamento do material do fundo do mar, construção civil, portos e manutenção portuária (dragagem), engenharia costeira e gestão das zonas costeiras, desenvolvimento de recursos marítimos, além de informações sobre reservatórios, barragens e rios. Isto posto, o presente estudo objetivou descrever os principais conceitos acerca da dinâmica das marés e definição dos NRH para estudantes, pesquisadores e profissionais de hidrografia.

É de suma importância o conhecimento específico das normas, metodologias e tecnologias utilizadas na hidrografia. No caso do Brasil, o órgão base de controladoria dos levantamentos hidrográficos é a Marinha do Brasil, pela DHN. Há também, uma organização internacional consultiva e técnica de hidrografia, estabelecida por vários países, a IHO.

A Marinha do Brasil em conjunto com a IHO são responsáveis pelo estabelecimento de normas, diretrizes e procedimentos para autorização que norteiam o controle de levantamentos hidrográficos. Neste sentido, a NORMAN-25 corresponde a norma, nacional, baseada em padrões internacionais que permitem classificar os levantamentos hidrográficos. Vale ressaltar que, a confecção da carta náutica exige o conhecimento dos referenciais de níveis utilizados em um LH e eles, atualmente no Brasil, diferem dos referenciais altimétricos terrestres.

Ao focar-se na cartografia náutica e na soberania do país, é possível compreender a importância da influência das marés e dos níveis de referência. No Brasil, existem inúmeros portos nos quais a amplitude da maré é tal que estes não podem ser demandados na baixa-mar, como é o caso de São Luiz do Maranhão, onde a amplitude de maré pode alcançar incríveis 7 metros (CASTRO; PEREIRA; OLIVEIRA, 2022). De forma a garantir a segurança, as cartas náuticas devem indicar as menores profundidades a serem encontradas, daí a importância da

definição coerente do Nível de Redução considerando as particularidades da maré de cada localidade.

Contudo, a importância do estudo da influência das marés e dos níveis de referência vão além daqueles relativos à cartografia náutica, sendo importantes também na geração de energia, biologia (exposição de algas à luz solar), geodésia/geofísica (determinação do geóide e da dinâmica da Terra), engenharia costeira (construção de portos, atracadouros, etc.), dentre outras áreas de aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTUNES, N. S. M. **The Importance of the Tidal Datum in the Definition of Maritime Limits and Boundaries**. In: BRADLEY, R.; SCHOFIELD, C. (ed.). *Maritime Briefing, International Boundaries Research Unit: University of Durham*, v. 2, n. 7, 38 p., 2000. ISBN 1-897643-38-1.

ARENTZ, M. F. R. **A modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no canal norte do estuário do Amazonas**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BALAY, M. A. **La cote du plan**. *Revue Hydrographic Internationale*, v. 24, n. 2. 1952.

BOON, J. D. **Secrets of the tide: tide and tidal current analysis and predictions, storm surges and sea level trends**. Elsevier Science, 2013. ISBN 9781782424352.

BRASIL. Portaria Normativa nº 452, 30 de março de 2007. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 02 abril. 2007.

CASTRO, R. M. S.; PEREIRA, E. D.; OLIVEIRA, M. M. **Avaliação da vulnerabilidade à intrusão marinha em aquíferos costeiros pelo método GALDIT: franja costeira de São Luís (MA) – BRASIL**. *Revista Caminhos de Geografia*, v.23, n. 89, p. 221-240, 2022. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG238960399>

CHM - CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Cartas Náuticas**. Marinha do Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/chm/chm/dados-do-segnav-cartas-nauticas/cartas-nauticas>. Acesso em: janeiro 2020.

COURTIER, A. **Marées**. *Service Hydrographique de la Marine*, p. 234, 1938.

DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (2º revisão)**. Marinha do Brasil, 2017.

DOODSON, A. T. **The harmonic development of the tide-generating potential**. *Proceedings of the Royal Society A – Mathematical, Physical and Engineering Science*, v. 100, n. 704, p. 305-329, 1921. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspa.1921.0088>

FERREIRA, Í. O. **Coleta, processamento e análise de dados batimétricos visando a representação computacional do relevo submerso utilizando interpoladores determinísticos e probabilísticos**. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

FIG - INTERNATIONAL FEDERATION OF SURVEYORS. **Publication n° 37: Guide on the Development of a Vertical Reference Surface for Hydrography**. Dinamarca. 2006. ISBN 87-90907-57-4.

FIG - INTERNATIONAL FEDERATION OF SURVEYORS. **Publication n° 62: Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography**. Dinamarca. 2014. ISBN 978-87-92853-09-7

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2ª edição. 344p. Niterói, 2009.

FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. **Modelagem do potencial anômalo no Datum Vertical Brasileiro visando a sua nova definição**. Boletim de Ciências Geodésicas, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 395-419, 2007.

FU, L.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry and Earth Sciences – A handbook of techniques and applications**. Academic Press, v. 69, p. 463, 2001. ISBN 0122695453.

GAGG, G. **Levantamentos Hidrográficos: Noções Gerais**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 41 p., 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/157210>. Acesso em: janeiro 2023.

GODIN, G. **The Analysis of Tides**. University of Toronto Press, 264 p., 1972.

HENDERSHOTT, M.; MUNK, W. **Tides**. Annual review of fluid mechanics, v. 2, n. 1, p. 205-224, 1970.

HUANG, J. **Determining Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Methods**. Geophysical Research Letters, v. 44, n. 21, p. 11-125, 2017.

IAG - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. **IAG Resolution (No. 1) for definition and realization of an International Height Reference System (IHR)**. Praga, República Tcheca. 2015. Disponível em: https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf. Acesso em: junho 2020.

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE**. Geophysical Research Letters, v. 44, n. 11, p. 5609–5617, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Esclarecimento sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e os Níveis de Redução e “Zeros” Hidrográficos no Litoral Brasileiro**. 2009. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvs.gb_nr.zh.pdf. Acesso em: janeiro de 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf. Acesso em: janeiro 2023.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **C-13: Manual on Hydrography – 1 ed.** International Hydrographic Bureau. Monaco, 2005.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **M-3: Resolutions of the IHO - 2 ed.** International Hydrographic Bureau, Monaco, 2010.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **S-4: Regulations of the IHO for International (Int) Charts and Chart Specifications of the IHO**. Special Publication 4.8 ed. International Hydrographic Bureau, Monaco. 2018.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **S-44: IHO Standards for Hydrographic Surveys**. Special Publication 6ed. International Hydrographic Bureau, Monaco. 2019.

LIMA, O. **Localização geodésica da linha da preamar média de 1831-LPM/1831, com vistas à demarcação dos terrenos de marinha e seus acrescidos**. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MACHUCA, M. C. A.; NOSSA, D. A. P.; TRULLO, L. J. S.; BARRERO, F. O. **Construcción de la superficie hidrográfica de referencia vertical para las bahías de Buenaventura y Málaga, Pacífico colombiano**. Boletín Científico CIOH, v. 36, p.53–69, 2018. DOI: <https://doi.org/10.26640/22159045.438>.

MADAH, F. A. **The amplitudes and phases of tidal constituents from Harmonic Analysis at two stations in the Gulf of Aden**. Earth Systems and Environment. v. 4, p. 321–328, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-020-00152-y>

MANDARINO, F.; NETO, A. A.; FOLLY, V. H. M. **Inland ENC: Perspectivas para a Cartografia Fluvial no Brasil**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 70, n. 5, p. 1551-1565, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv70n5-44558>

MESQUITA, A. R.; FRANCO, A.; HARARI, J. **On Mean Sea-level along the Brazilian Coast**. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. v. 87, p. 67-77, 1986.

MIGUENS, A. P. **Navegação: a Ciência e a Arte. Volume I - Navegação costeira, estimada e em águas restritas**. Diretoria de Hidrografia e Navegação, Rio de Janeiro, 538 p., 1996.

MELO FILHO, E. **Maré Meteorológica na Costa Brasileira**. 328 f. Tese (Professor Titular - Escola de Engenharia) Universidade Federal de Rio Grande, 328 p, 2017

MENEZES, D. C. **Contribuições metodológicas para a análise de flutuações atmosféricas e oceanográficas de baixa frequência na costa do Estado do Rio de Janeiro**. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

NETO, P. B. L.; SAAVEDRA, O. R.; RIBEIRO, L. A. S. **Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints**. *Renewable Energy*, v. 81, p. 11-20, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.011>

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. Chichester, UK. John Wiley & Sons, Ltd. 486 p., 1987.

PUGH, D. T. **Tides**. In: STEELE, J. H.; THORPE, S. A.; TUREKIAN, K. K (ed). *Encyclopedia of Ocean Sciences*. Academic Press, San Diego, p. 2961-2968, 2001.

PUGH, D. T. **Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather and Climate**. Cambridge University Press, 280 p., 2004.

QUINN, N.; ATKINSON, P. M.; WELLS, N. C. **Modelling of tide and surge elevations in the Solent and surrounding waters: The importance of tide surge interactions**. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 112, p. 162–172, 2012.

RAHMAN, M. F. A.; DIN, A. H. M. **The Development of Continuous Hydrographic Datum Using Geodetic Based Approaches: A Review**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 540, 2020.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso**. 221p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

REIS, V. P.; PALMEIRO, A. S.; BARBOSA, L. G. **Estudo da obtenção do Nível Médio do Mar com altimetria por satélites**. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 6, n. 1, p. 3-22, 2018.

ROBIN, C.; NUDDS, S.; MACAULAY, P.; GODIN, A.; BOOM, B. L.; BARTLETT, J. **Hydrographic Vertical Separation Surfaces (HyVSEPs) for the Tidal Waters of Canada**. *Marine Geodesy*, v. 39, n. 2, p. 195-222. 2016. DOI: [10.1080/01490419.2016.1160011](https://doi.org/10.1080/01490419.2016.1160011)

SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M. G. **Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHR)**. *Geophysical Journal International*, v. 209, n. 2, p. 570-586, 2017.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. **Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 2, p. 345-364, 2020.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. 2º ed. New York: Walter de Gruyter, 2003.

SILVA, A. A. A.; FREIRE, E.; CRISÓSTOMO, G. **Variações do nível médio anual do mar em Cascais: características e tendências**. *Estudos do Quaternário/Quaternary Studies*, n. 5, p. 51-66, 2014. DOI: <https://doi.org/10.30893/eq.v0i5.61>.

SILVA, L. M; FREITAS, S. R. C.; DALAZONA, R. **Análise de séries temporais maregráficas correlacionadas com observações GNSS no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 68, n. 1, p.73-90, 2016.

SILVA, V. C.; GUIMARÃES, N. **Análise do Potencial de Gravidade nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia Obtido com Diferentes Modelos Geoidais.** Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ, v. 41, n. 0101–9759, p. 605–613, 2018.

SILVA, L. M.; FREITAS, S. R. C. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba.** Revista Cartográfica, n. 98, p. 33–57, 2019.

SLGO - ST. LAWRENCE GLOBAL OBSERVATORY. **Dynamic vertical clearance – Summary.** 2020. Disponível em: <https://slgo.ca/en/navigation/marine-conditions-clearance/chs-clearance/summary>. Acesso em: abril 2020.

SOARES, S.; SANTOS, E. G.; LUZ, R. T. **Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como Insumo para Integração de Altitudes e Profundidades: Resultados Preliminares.** Anais do VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 742-751, 2018.

VALENTIM, S. S. **Análise das Variações do Nível Médio do Mar (NMM) em Ubatuba (SP) a partir de dados maregráficos.** 98p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2012.

VEDANA, J.; PAIOTTI DO CANTO, M; SCHVAMBACH, A. **Relação da intensidade e direção do vento com a maré meteorológica.** Metodologias e Aprendizado, v. 4, p. 73–81, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21166/metapre.v1i.1455>

WELLS, D. E.; KLEUSBERS, A.; VANICEK, P. **A Seamless Vertical-Reference Surface for Acquisition, Management and ECDIS Display of Hydrographic Data.** Technical Report n° 179 – Department of Geodesy and Geomatics Engineering – University of New Brunswick. 1996. Disponível em: <http://www2.unb.ca/gge/Pubs/TR179.pdf>. Acesso em: novembro. 2022.

WHITE, J. **Tides: The Science and Spirit of the Ocean.** Trinity University Press, 360 p., 2017.

CAPÍTULO 2. COMPARAÇÃO DAS VARIAÇÕES DO NÍVEL MÉDIO DO MAR A PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITES E MAREGRAFIA EM FORTALEZA – CE

Resumo

Historicamente as variações do Nível Médio do Mar (NMM) têm sido estimadas a partir de dados provenientes de marégrafos instalados na costa. No entanto, diante da dificuldade de obtenção de longas séries de dados maregráficos, vê-se como alternativa a utilização de dados da Altimetria por Satélite (ALTSAT). Neste sentido, o presente capítulo tem como objetivo propor uma metodologia para obter o NMM por ALTSAT e compara-lo com o NMM obtido por maregrafia. Para este propósito, obteve-se dados da missão CryoSat-2 e da estação maregráfica EMFOR (Fortaleza-CE), pertencente a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), referentes ao período entre fevereiro de 2011 e maio de 2019. A análise relativa procedeu-se pela estimativa mensal do NMM obtido a partir de ambas as técnicas e compatibilizações de referenciais. Por fim, os valores obtidos pela ALTSAT foram comparados com os dados maregráficos coletados *in loco*, com base em critérios da estatística descritiva. Os resultados expuseram que os dados da técnica ALTSAT apresentaram valores coerentes com os de maregrafia, apresentando discrepância média de 4 mm. Além disso, ambas as técnicas concordaram indicando uma elevação média do nível do mar no período analisado. Os resultados demonstraram que é viável a utilização de dados ALTSAT para a definição do NMM e pode ser empregada alternativamente ao uso de estações maregráficas, reduzindo sobretudo, os custos de levantamentos de campo. Ademais, a técnica ALTSAT também permite a obtenção de estimativas para locais em que dados maregráficos são inexistentes ou de baixa acurácia.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do comportamento do nível do mar é de grande interesse para estudos sobre as mudanças do clima na Terra, para as populações que vivem em regiões costeiras e para a segurança das atividades relacionadas à navegação em geral. Em uma metodologia clássica, o nível do mar pode ser registrado, basicamente, por meio da aquisição de dados de marégrafos (de boia, pressão, digitais, radar ou a laser) e réguas linimétricas (CAZENAVE; NEREM, 2004).

Tradicionalmente, a régua e o marégrafo são as principais fontes para o registro local das oscilações diárias do nível do mar, bem como para o cálculo de estimativas das componentes harmônicas de maré. Estes instrumentos fornecem medições relativas da maré (em relação a costa terrestre). Porém, podem ser afetadas pela movimentação da crosta, além de apresentar problemas espaciais de distribuição, ou seja, se localizam nas margens continentais, em ilhas que geralmente estão distantes entre si (NEREM; MITCHUM, 2002; WOODWORTH; PLAYER, 2003; COELHO, 2016).

A ALTSAT fornece medidas do nível absoluto do mar (referenciado ao elipsoide) possibilitando a estimativa das marés de forma global. Apesar do ciclo de repetição, ou seja, da resolução temporal dos satélites serem de dias, suas observações são obtidas com alta resolução e essa viabilidade estimulou a comunidade científica a desenvolver melhorias na técnica ALTSAT, bem como na metodologia e modelagem das marés durante as últimas décadas (NEREM; MITCHUM, 2001; REIS; PALMEIRO; BARBOSA, 2018).

A necessidade de conhecer o nível do nível do mar e sua variação, é relevante em levantamentos hidrográficos, em projetos oceânicos e próximos da costa, entre outros. No entanto, em alguns locais não é possível obter dados maregráficos ou dispor de recursos financeiros para instalação de marégrafos ou régua linimétricas.

A obtenção do Nível Médio do mar Local (NML) e o conhecimento da variação do nível da água a partir da ALTSAT pode ser uma possibilidade de solução deste problema, pela obtenção de longas séries temporais e dados disponibilizados gratuitamente. Nos últimos anos vários estudos têm sido desenvolvidos com base em dados da ALTSAT, proporcionando conhecimento em escala global e regional (DALAZOANA; LUZ; FREITAS, 2005; REIS; PALMEIRO; BARBOSA, 2018).

Daher et al. (2015) compararam três modelos clássicos de componentes da maré provenientes de marégrafos com as componentes da maré extraídas de dados ALTSAT. A análise se deu através do método estatístico *Root Sum Squared* (RSS), resultando em diferenças de 12 cm nas regiões de águas profundas e exibiram resultados com as mesmas diferenças em água rasas. Reis, Palmeiro E Barbosa (2018) discutiram qualitativamente sobre a obtenção do NMM a partir da ALTSAT, visando a importância deste para a determinação da TNMM.

Pajak e Kowalczyk (2019) avaliaram as variações sazonais do nível do Mar Báltico a partir de dados ALTSAT no período entre 1993 e 2015. Os resultados foram comparados aos dados de marégrafos e apontam para diferenças nas amplitudes anuais entre os dados de ALTSAT e o marégrafo, respectivamente, entre 0,33 cm e 1,53 cm.

Silva e Freitas (2019) analisaram a evolução temporal do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de séries temporais associados a dados de posicionamento por *Global Navigation Satellite System* (GNSS), observações maregráficas e Altimetria por Satélites (multimissões de 1991 a 2015). Os resultados se apresentaram em consonância com a integração do *International Height Reference System* (IHRs) e evidenciaram uma taxa de elevação do NMM de 2,24 mm/ano para a região do *Datum*.

Na Austrália, Karimi, Andersen e Deng (2020), utilizaram dados de sete anos da emissão CryoSat-2 a fim de determinar a TNMM e comparar com dados de maregrafia e dois modelos de TNMM globais. Comparado aos modelos globais, a $TNMM_{CryoSat-2}$ exibiu altos valores, justificado pela elevação do Nível Médio do Mar; em relação aos dados maregráficos, a $TNMM_{CryoSat-2}$ apresentou resultados semelhantes e estatisticamente melhores do que os modelos globais na representação regional.

De acordo com Dalazona, Luz e Freitas (2005), as variações do NMM, historicamente, têm sido estabelecidas a partir de dados maregráficos, contudo, a tecnologia ALTSAT vem se apresentando como uma alternativa ao método clássico.

Tendo como incentivo, ampliar as possibilidades de obtenção de informações sobre o comportamento do nível do mar e viabilizar o planejamento de usos e gestão da zona costeira, este capítulo, visa aplicar uma metodologia para obtenção do NMM a partir de dados ALTSAT. Para isso, foi realizada uma comparação do NMM obtido por dados da missão CryoSat-2 e dados maregráficos da estação EMFOR (Fortaleza-CE), em uma série temporal de 9 anos (2011-2019).

2. ALTIMETRIA POR SATÉLITE

2.1 Princípio da altimetria por satélite

A Altimetria por Satélite é uma técnica de sensoriamento remoto que tem sido aplicada com eficácia em monitoramentos da superfície do mar, rios, lagos, camadas de gelo e até mesmo da superfície terrestre (BOSCH, 2003). O princípio de medida da ALTSAT é baseado na emissão de pulsos de energia na frequência das micro-ondas e mede o tempo desde a emissão até o retorno do sinal refletido pela superfície do mar. Em geral, o radar altímetro trabalha na Banda Ku, que tem uma frequência de aproximadamente 13,5 GHz, correspondendo a um comprimento de onda (λ) de aproximadamente 2,2 cm (SEEBER, 2003).

Expressa-se a altitude (R) desde a antena do altímetro até a superfície do oceano conforme Chelton et al. (2001):

$$R = \frac{1}{2}c\Delta t - \sum \Delta e \quad (1)$$

em que:

c: velocidade de propagação da luz no vácuo;

Δt : tempo de percurso do sinal emitido e refletido;

Δe : correções instrumentais, atmosféricas, superficiais e geofísicas.

A altitude (R) é estimada considerando que o sinal do radar se propaga com a velocidade da luz. No entanto, a velocidade de propagação do sinal na atmosfera sofre um atraso, resultando na superestimação da medida. Desta forma, por convenção, considera-se que todas as correções sejam positivas (CHELTON et al., 2001).

O somatório das correções necessárias envolve uma série de parâmetros necessários para eliminar efeitos que afetam as medidas do altímetro e é expressa por Luz (2008):

$$\sum \Delta e = \sum e_{inst} + \sum e_{atm} + \sum e_{sup} + \sum e_{geof} \quad (2)$$

As principais correções instrumentais (e_{inst}) referem-se a distância entre o centro de fase da antena do radar e o centro de massa do satélite, à deriva do temporizador, às variações de atitude do satélite, às alterações de frequência do sinal refletido, aos ajustes introduzidos pelos próprios sistemas de coleta e tratamento do sinal refletido, embarcados no satélite (CHELTON et al., 2001; SEEBER, 2003). Segundo Luz (2008), estes últimos erros influenciam nos momentos de transição de superfície, por exemplo quando o satélite passa a receber sinais de retorno de áreas terrestres após ter sobrevoado a superfície oceânica, afetando assim as aplicações específicas da ALTSAT em áreas costeiras, como as pretendidas neste projeto.

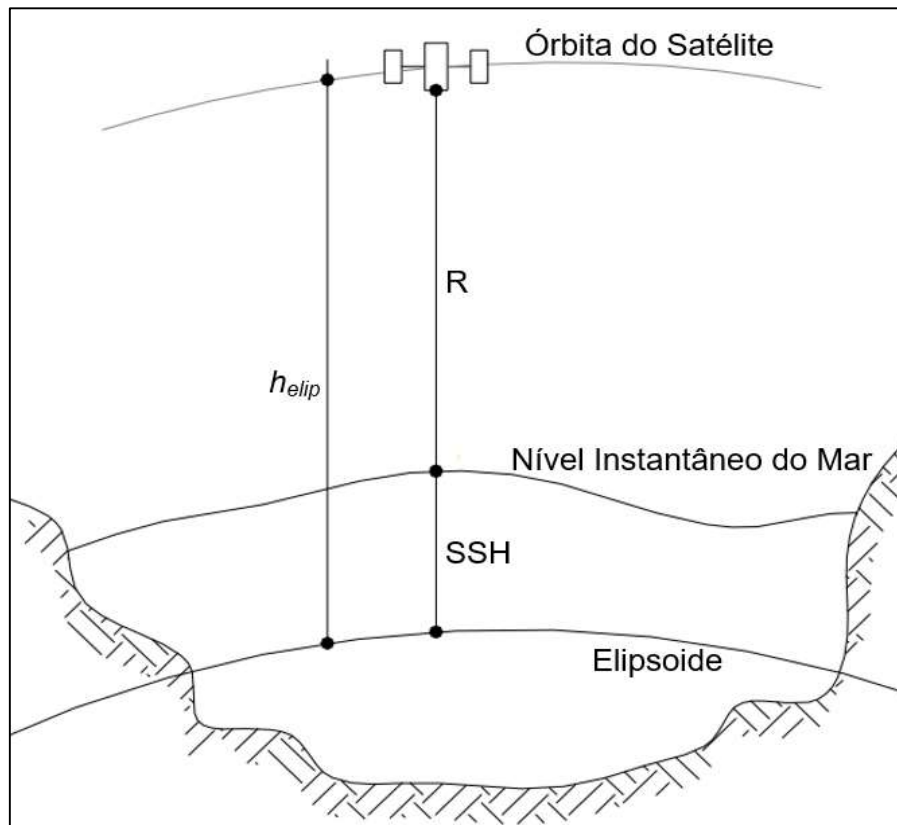
A influência da ionosfera e troposfera na velocidade de propagação do sinal são as principais responsáveis pelos erros atmosféricos (e_{atm}). As correções de superfície (e_{sup}) fazem referência a irregularidade da superfície oceânica em função das ondas, introduzindo um desvio em relação ao NMM instantâneo conhecido como *Sea State Bias* (SSB). Já as marés terrestres e oceânicas, o nível dinâmico do mar, as alturas geoidais e o efeito do barômetro inverso (variação da pressão atmosférica) representam as correções geofísicas (e_{geof}) (SEEBER, 2003; LUZ, 2008).

Conhecendo-se a órbita do satélite em relação a um elipsoide de referência, a altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_{elip}) também é conhecida (Figura 1) e a partir desta

é possível obter a altitude da superfície instantânea do mar *Sea Surface Height* (SSH) pela Equação 3 (SEEBER, 2003).

$$\text{SSH} = h_{elip} - R \quad (3)$$

Figura 1 – Princípio da Altimetria por Satélite.



Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Além do SSH outras informações a partir da medida do altímetro são comumente utilizadas em diversas aplicações, conforme Equações 4, 5 e 6 e ilustrado na Figura 2 (BIROL et al., 2004; PAJAK; KOWALCZYK, 2019):

$$\text{SLA} = \text{SSH} - \text{MSS} \quad (4)$$

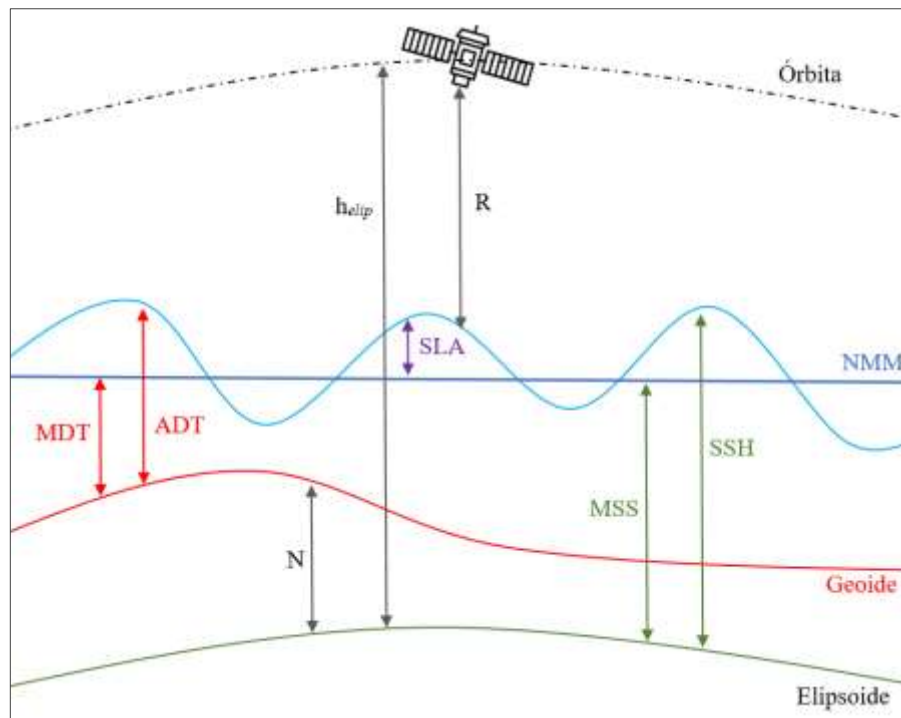
$$\text{ADT} = \text{SLA} + \text{MDT} \quad (5)$$

$$\text{MDT} = \text{MSS} - \text{N} \quad (6)$$

em que: *Sea Level Anomaly* (SLA) é anomalia do nível do mar em relação ao NMM; *Mean Sea Surface* (MSS) é a superfície média do mar; *Absolute Dynamic Topography* (ADT) é a topografia dinâmica absoluta e; *Mean Dynamic Topography* (MDT) é a Topografia do Nível

Médio do Mar (TNMM). A altura geoidal (N) pode ser extraída de alguns modelos globais geopotenciais disponíveis, como, EGM2008 e XGM2019.

Figura 2 – Superfícies de referência da Altimetria por Satélite.



Fonte: Adaptado de Fu e Cazenave (2001) e Seeber (2003).

2.2 CryoSat-2

A Agência Espacial Europeia (do inglês, *European Space Agency* - ESA) lançou a primeira missão CryoSat em 2005, mas devido a uma falha no lançamento o satélite original foi perdido. Posteriormente, um novo satélite foi construído com várias melhorias e em abril de 2010 foi lançado o CryoSat-2 (CS-2) (ESA, 2023).

A missão CryoSat é a primeira missão da Europa que teve como objetivo medir a extensão do desgaste do gelo ártico, realizar o monitoramento das variações das espessuras das camadas de gelo marinho e continental, a fim de fornecer informações precisas para estudos sobre a relação entre o gelo e o clima global. O CS-2 também é uma fonte valiosa de dados para a comunidade oceanográfica, geofísica e geodésica por medir parâmetros geofísicos de alta resolução desde o oceano aberto, às proximidades da costa, lagos e rios no interior dos continentes (IDŽANOVIC; OPHAUG; ANDERSEN, 2018; ESA, 2023).

O CS-2 está equipado com um satélite altimétrico de radar interferométrico de abertura sintética, (do inglês, *Synthetic Interferometric Radar Altimeter* - SIRAL), que é um altímetro

de frequência simples da banda Ku capaz de operar em três modos com diferentes resoluções. No modo de baixa resolução (do inglês, *Low Resolution Mode* - LRM), o satélite opera como um altímetro convencional com pulsos limitados, com uma frequência de repetição de pulsos de 1,9 KHz e largura da faixa da trilha de 10 a 15 Km. O modo *Synthetic Aperture Radar* (SAR) apresenta uma frequência de repetição de pulso aumentada para 18,1 KHz, o que implica em uma largura em aproximadamente 400 a 300 m. O modo SAR Interferométrico (SARIn) é semelhante ao modo SAR, mas inclui uma antena receptora adicional capaz de aprimorar o detalhamento dos dados na trilha a partir das propriedades Doppler dos pulsos. Esta tecnologia permite detectar medições fora do nadir, ou seja, na direção transversal, oferecendo uma oportunidade para monitorar pequenos lagos e sistemas fluviais em topografia acidentada, os quais não são detectados por outros satélites altimétricos (SCAGLIOLA et al., 2018; JIANG et al., 2020; ESA, 2023)

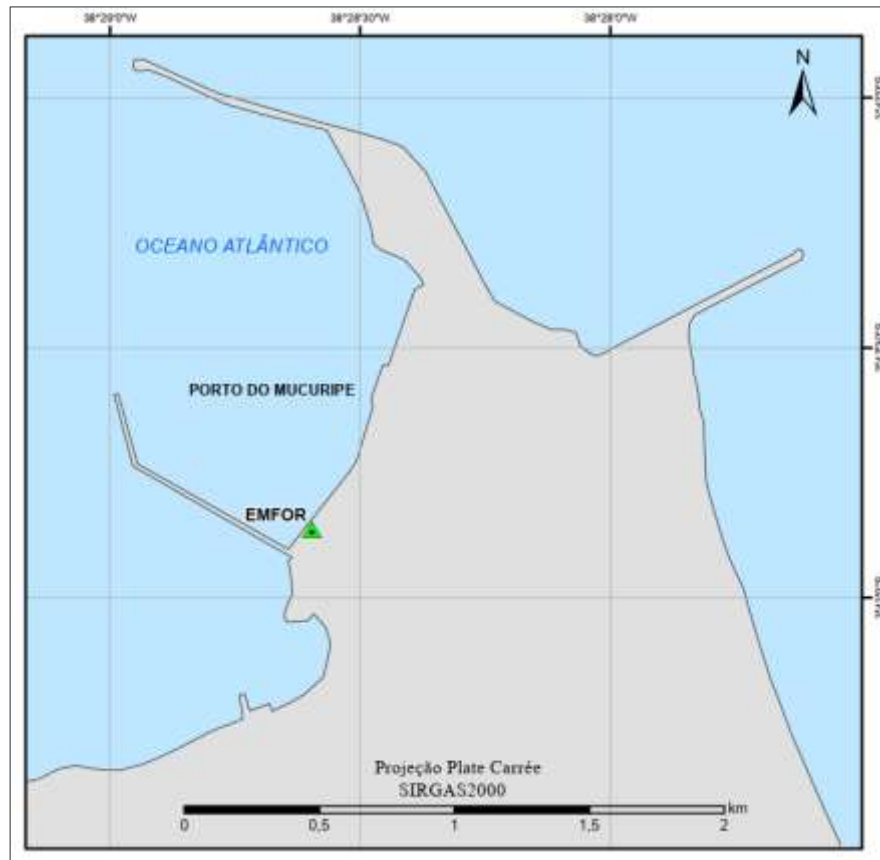
A órbita do satélite CS-2 tem uma altitude média de 717 km (*Low Earth Orbit* - LEO) e uma inclinação excepcionalmente alta de 92°, permitindo medições em altas latitudes (até 88° Norte e Sul) com a finalidade de maximizar a cobertura nos polos. Sua órbita não é síncrona ao Sol e não é fixa, como geralmente é o caso das missões de altimetria oceânica. O ciclo de repetição completo da órbita é de 369 dias. Essa órbita também tem um subciclo de 30 dias, o que resulta em trilhas terrestres densas, ou seja, um espaçamento entre trilhas menor ao longo de um ciclo de repetição completo. Esta órbita especial permite muitas oportunidades para estudar corpos de água interiores (ANDERSEN; KNUDSEN; STENSENG, 2015; BOUFFARD et al., 2017).

Seu principal produto, disponível para a comunidade, contém a altura da superfície acima do elipsoide de referência (WGS84) ao longo das trilhas, juntamente com todos os dados auxiliares necessários para explorar totalmente essas medições. Os dados são ofertados com diversas correções, como; a eliminação de *outliers*, correções de efeitos instrumentais, correção dos efeitos atmosféricos (correção barométrica inversa, ionosfera, troposfera seca e úmida) e efeitos geofísicos (correções de marés terrestres, oceânicas, efeito polar, efeitos de cargas oceânicas e variações do estado do mar) (AVISO, 2021). Estes são disponibilizados até 30 dias após a aquisição dos dados e estão disponíveis desde junho de 2010 no site da ESA (2022). Outros produtos também estão disponíveis para usuários especializados (como cientistas específicos) que contêm os ecos de radar em vários níveis de processamento (ESA, 2023).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste capítulo utilizou-se dados da estação maregráfica EMFOR, localizada dentro das instalações do Porto de Macuripe em Fortaleza no Estado do Ceará (Figura 3).

Figura 3 – Localização do Porto do Macuripe e marégrafo EMFOR.

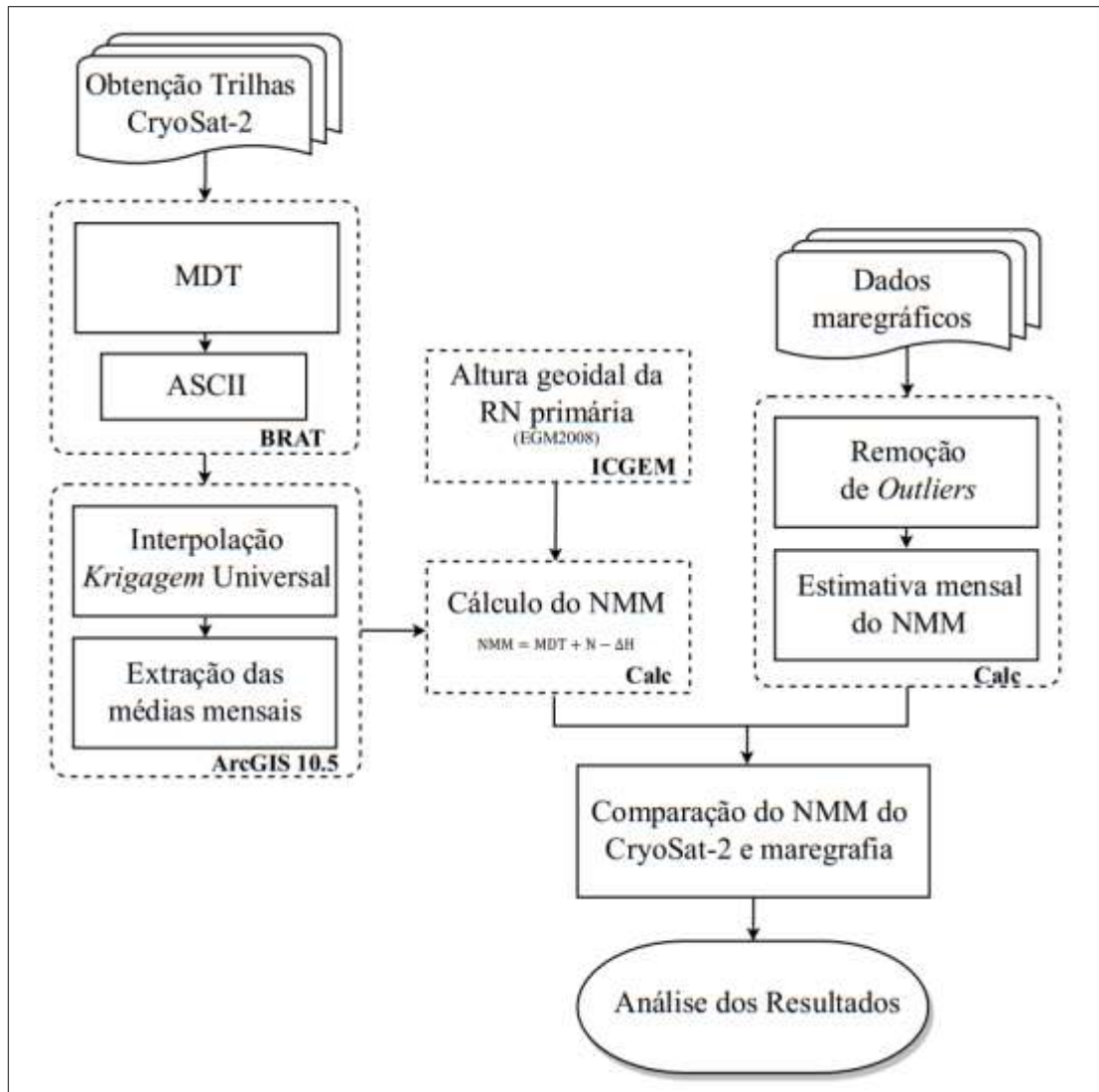


Fonte: Autora.

Considerou-se os seguintes fatores para a determinação da área de estudos: i) a faixa litorânea do estado do Ceará ser em sua maioria linear, sendo interrompidas por apenas algumas pontas e promontórios que se projetam para o mar, como é o caso do Porto de Macuripe (local onde se encontra o marégrafo); ii) disponibilidade de dados de longas séries temporais contínuas advindos das técnicas de ALSTAT e maregrafia; e por fim, iii) de acordo com o relatório do IBGE (2016), a EMFOR apresentou resultados favoráveis no Teste de *Van de Castele* indicando que não houveram derivas nos seus sensores eletrônicos (radar, *encoder* e pressão).

A Figura 4 apresenta um fluxograma ilustrando os principais passos da metodologia abordada.

Figura 4 – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Autora.

A estação maregráfica de Fortaleza-CE (EMFOR) pertence à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) e tem seus dados disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Todas as informações sobre o conjunto de dados do marégrafo de Fortaleza estão disponíveis no site da RMPG². A fim de possibilitar uma análise temporal, foram obtidos valores diários do nível do mar entre fevereiro de 2011 e maio de 2019.

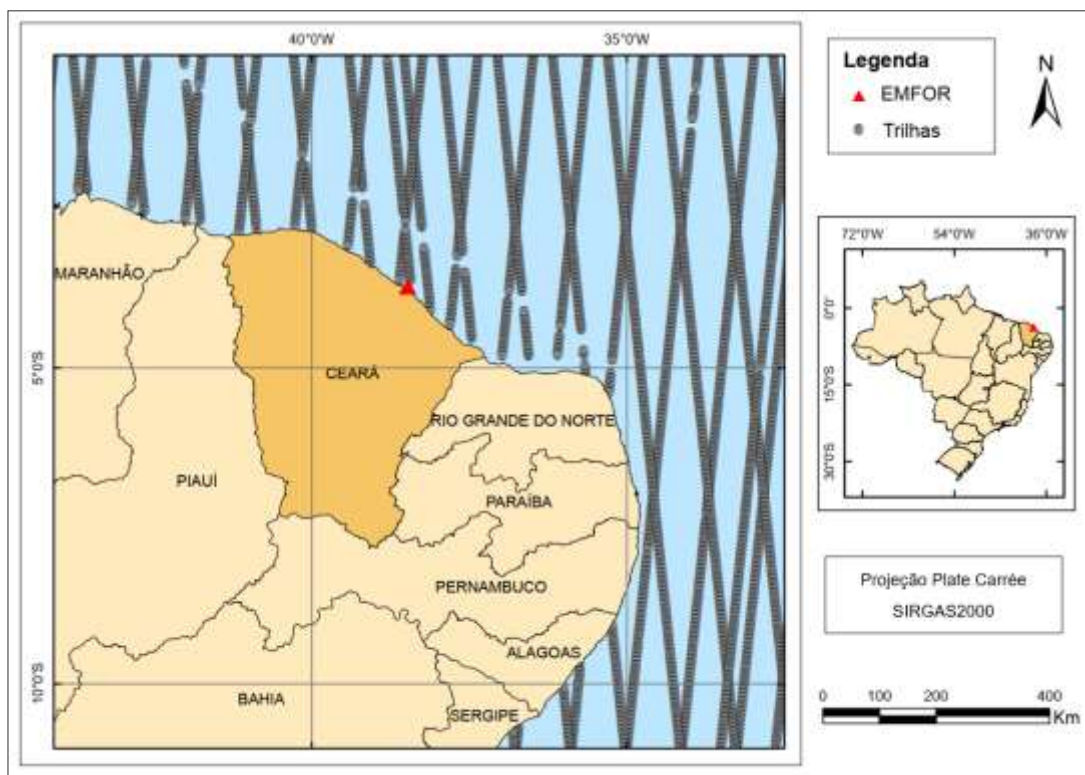
Foi realizada uma análise visual gráfica e eliminado os *outliers* do conjunto de dados. Posteriormente agrupou-se os dados por meses e calculou-se a média dos valores do NMM mensal. Vale salientar, que propositalmente não foram aplicados filtros de suavização e demais

²<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia.html?=&t=downloads>

correções nos dados maregráficos com o intuito de comparar a técnica ALTSAT aos dados brutos de maregrafia na estimativa do NMM.

Para a técnica ALTSAT, utilizou-se os dados do *Mean Dynamic Topography* (MDT) provenientes da missão CryoSat-2 (CS-2). Estes possuem diversas correções, como, de efeitos atmosféricos e geofísicos. As informações sobre as correções no conjunto de dados provenientes da técnica de ALTSAT estão disponíveis no site da CMEMS³. A Figura 5 apresenta a estação maregráfica de Fortaleza - CE (EMFOR) além das trilhas de dados da missão CS-2 nas proximidades do marégrafo.

Figura 5 – Marégrafo EMFOR e as trilhas do CS-2 em um mês de dados.



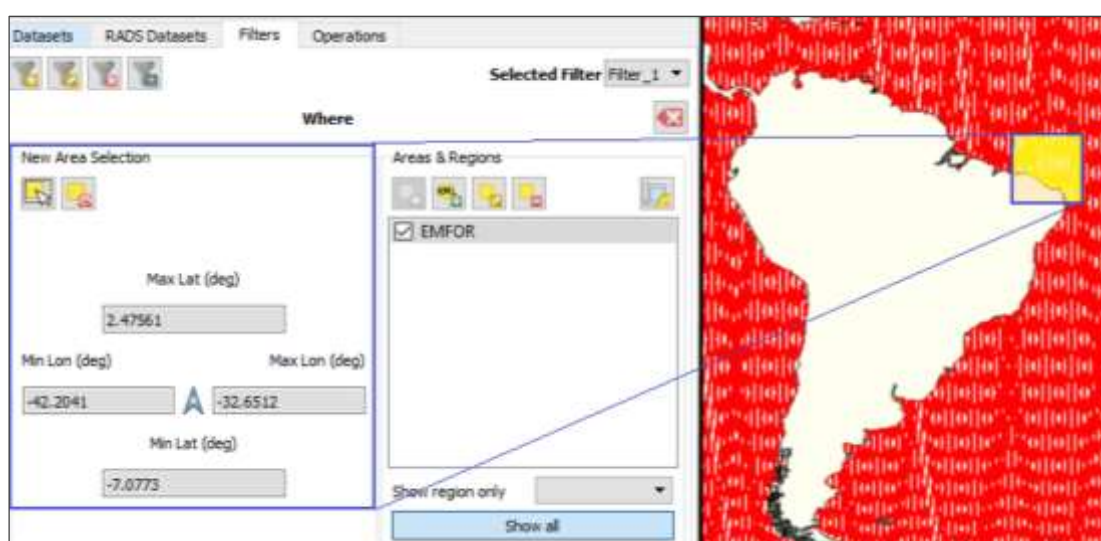
Fonte: Autora.

Os dados do CS-2 são criptografados e se encontram disponíveis em extensão .nc (*Network Common Data Form* – NetCDF), sendo necessário aplicar um *software* específico para o tratamento dos mesmos. Para isto, utilizou-se o *software Broadview Radar Altimetry Toolbox* (BRAT) versão 4.2.1, no qual corresponde a um projeto conjunto entre a *European Space Agency* (ESA) e o *Centre National D'Etudes Spatiales* (CNES), que possibilitou o desenvolvimento de uma ferramenta de código aberto (GPL-3), disponível gratuitamente para a comunidade (ROSMORDUC et al., 2016).

³ <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>

Após a obtenção dos dados de MDT do CS-2 referentes ao período entre fevereiro de 2011 e maio de 2019, importou-se os arquivos com a extensão .nc para o BRAT e aplicou-se filtros com as coordenadas geográficas no entorno do marégrafo (aproximadamente $9^\circ \times 10^\circ$) de Fortaleza (SIRGAS2000), com a finalidade de extrair as informações de Latitude, Longitude e valores de MDT da região de interesse (Figura 6). Posteriormente estas informações foram exportadas em formato *American Standard Code for Information Interchange* (ASCII).

Figura 6 – Trilhas do CS-2 e o filtro na região do marégrafo.



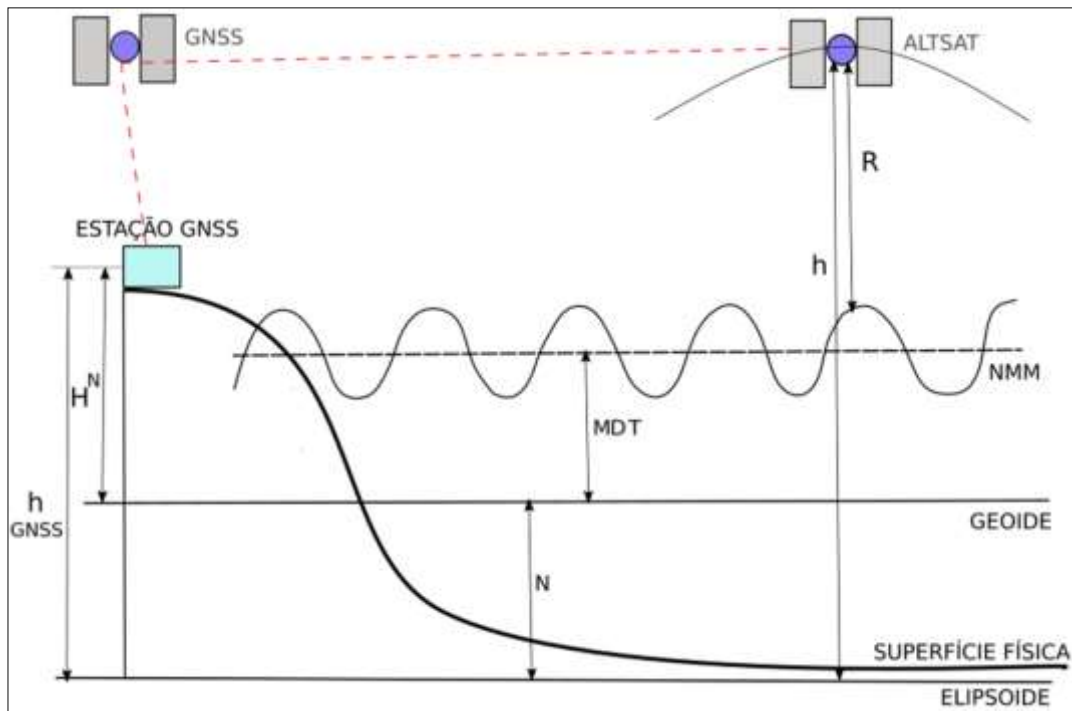
Fonte: Autora.

Devido aos dados de ALTSAT estarem dispostos em trilhas, foi necessário estimar as lacunas entre as trilhas do satélite a partir de um interpolador. Para este propósito, fez-se uso, da licença cedida pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa, do *software* ArcGIS versão 10.5 da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), com a finalidade de estimar os valores de MDT não amostrados utilizando a interpolação por Krigagem. A vantagem da utilização deste interpolador consiste, basicamente, na estimativa com variância e tendência mínima (MATHERON, 1967; CRESSIE, 1990). Além do mesmo se mostrar eficiente em estudos relacionados a levantamentos batimétricos, conforme demonstrou Ferreira (2018).

Após a interpolação dos dados de MDT mensais dos 9 anos para o marégrafo EMFOR, realizou-se integração entre as superfícies de referências nas técnicas de maregrafia e ALTSAT. A maregrafia mede as variações do nível do mar em relação à uma superfície de referência local (Nível Médio do Mar Local-NML) e pode ser relacionada a uma altitude elipsoidal de uma estação GNSS próxima. Já a Altimetria por Satélite realiza as mensurações em relação a um elipsoide e modelo geoidal de referência (CS-2 utiliza o elipsoide WGS84 e modelo geoidal

global EGM2008). Dessa forma, foi necessário compatibilizar as superfícies de referência das duas técnicas (PAJAK; KOWALCZYK, 2018). A Figura 7 ilustra o esquema de integração entre as técnicas de maregrafia e ALTSAT.

Figura 7 – Esquema de integração de maregrafia e ALTSAT.



Fonte: Adaptado de Fu e Cazenave (2001) e Seeber (2003).

Essa compatibilização entre as superfícies é problemática, uma vez que os dados não se referem ao mesmo sistema de referência (LIEBSCH et al., 2010). Uma opção para integrar as diferentes superfícies e obter o NMM é a aplicação da Equação 7 junto aos dados da técnica ALTSAT (KUCZYNSKA-SIEHIEN et al., 2016):

$$\text{NMM} = \text{MDT} + \text{N} - \Delta\text{H} \quad (7)$$

em que:

N - Altura geoidal em EGM2008, obtida no sítio *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM⁴);

ΔH - diferença entre a Referência de Nível (RN) vizinha e o NML do marégrafo (valor extraído do relatório da RMPG⁵ e F-41-701-001/95).

⁴ <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>

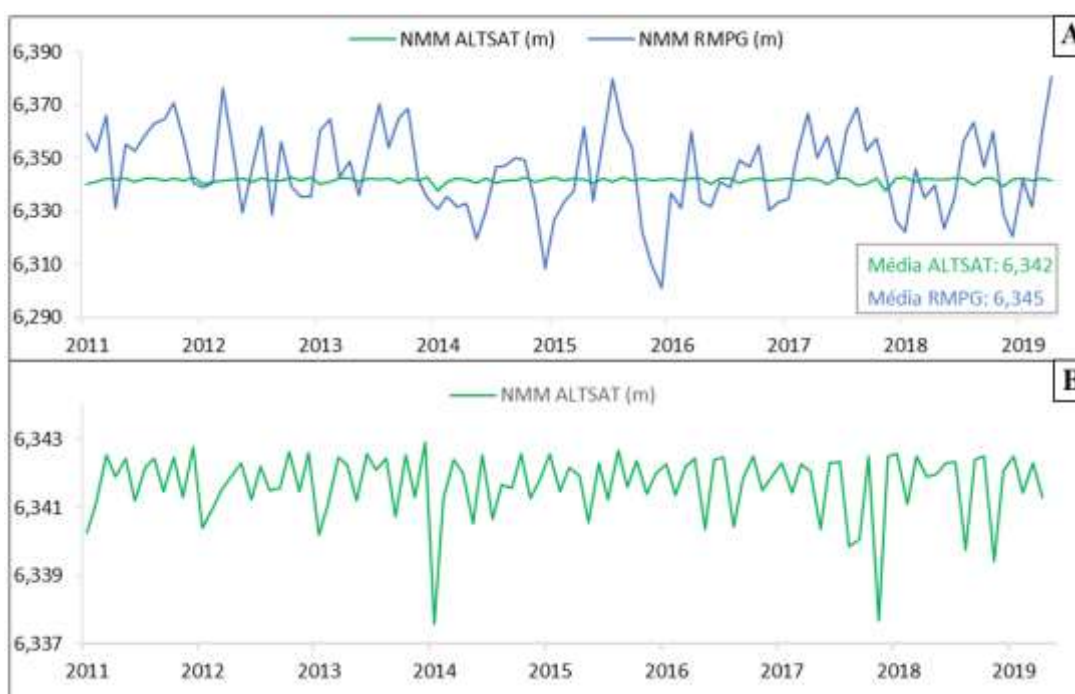
⁵ ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf

De posse dos valores mensais do NMM obtido pelos dados do CS-2 e maregrafia, realizou-se a comparação do NMM, em ambas as técnicas, de forma a avaliar se os dados do CS-2 são viáveis para a definição do NMM. A partir das séries temporais mensais foi possível analisar as variações do NMM nas diferentes técnicas por métodos estatísticos, como, média, mediana, valor máximo e valor mínimo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Silva e Freitas (2019) evidenciaram que, ao realizar a comparação entre as técnicas de ALTSAT e maregrafia é importante levar em consideração duas situações: as observações maregráficas devem possuir a mesma amostragem dos satélites altímetros; e, necessita-se trabalhar com uma série temporal de pelo menos 5 anos de observações. Tais condições foram atendidas, uma vez que se utilizou dados mensais, para ambas as técnicas, ao longo de 2011 a 2019. Os resultados referentes às médias mensais relativas do NMM obtidas por ALTSAT e o marégrafo da RMPG estão ilustrados através da Figura 8 e Tabela 1.

Figura 8 – Comparação das variações do NMM: A) ALTSAT e maregrafia; B) Detalhe para a variação do NMM para ALTSAT.



Fonte: Autora.

Tabela 1– Relatório do NMM para as técnicas ALTSAT e maregrafia.

Estatística	ALTSAT (m)	RMPG (m)	Discrepância entre as técnicas (m)
Média	6,342	6,345	0,004
Mediana	6,342	6,346	0,005
Máximo	6,343	6,381	0,040
Mínimo	6,338	6,301	-0,041
Amplitude	0,005	0,080	0,080
Desvio Padrão	0,001	0,016	-

Fonte: Autora.

A Figura 8A apresenta o comparativo das variações relativas do NML obtidos por ALTSAT e maregrafia. A Figura 8B se encontra em uma escala diferenciada, a fim de melhor ilustrar a variação dos valores de ALTSAT. Ressalta-se que os dados desta estação não passaram por filtragens, assim, eles refletem tanto a maré astronômica quanto a maré meteorológica que é ocasionada por efeitos meteorológicos, como, chuva, secas, tufões e outros.

Analisando a Figura 8, é possível identificar, para os dados maregráficos da estação EMFOR, picos mais discrepantes entre agosto de 2015, janeiro de 2016 e maio de 2019. Os picos evidenciados podem ser atribuídos a efeitos atmosféricos, em destaque o fenômeno oceânico-atmosférico *El Niño*, responsável pelo aquecimento da camada mais superficial do Oceano Pacífico (KAYANO et al., 2016; MOHAMMADI; GOUDARZI, 2018). De acordo com INPE (2020), a ocorrência deste evento foi identificada em 2015-2016 e classificado de forte intensidade em função da escala do CPC/NCEP/NOAA. Este efeito provoca secas severas na região Nordeste do Brasil, fato que justifica o ponto discrepante de janeiro de 2016 (4,5 cm em relação à média RMPG).

O pico referente a agosto de 2015 (3,4 cm em relação à média RMPG) não foi possível relacioná-lo ao fenômeno *El Niño* e a qualquer outro efeito meteorológico investigado na região. Segundo Martins e Vasconcelos Júnior (2017) a região Nordeste do país sofreu uma severa seca com duração de 2012 a 2016, tendo seu ápice entre os anos de 2014 a 2016, logo este pico apresenta comportamento controverso ao esperado, podendo este estar associado a movimentação atípica do Porto. Em contrapartida o primeiro semestre de 2019 foi marcado por fortes chuvas registradas, sendo considerado o mais chuvoso nos últimos anos (MONTEIRO; ZANELLA, 2019). Fato que é explicitado pelo pico em maio de 2019 (Figura 8A).

Já na Figura 8B, os picos são suaves, apresentando aproximadamente 5 mm de discrepância em relação à média ALTSAT. Além disso, ao analisar também a Figura 7A pode-

se identificar correspondência no comportamento dos dados do marégrafo, desta forma, admite-se que ambas as técnicas foram influenciadas provavelmente por forças astronômicas.

A partir da Tabela 1 é possível identificar maior diferença nos valores de máximo e mínimo para dados da RMPG, quando comparado à ALTSAT. Essa diferença é evidenciada pelas amplitudes de 0,005 m e 0,080 m para ALTSAT e maregrafia, respectivamente. Esta disparidade se deve, sobretudo, devido aos dados ALTSAT serem acrescidos de diversas correções, como, dos efeitos atmosféricos e geofísicos (AVISO, 2021). Já os dados de maregrafia foram submetidos apenas a eliminação de *outliers*, assim, não havendo correções e suavizações, estando em seu valor puro.

O desvio padrão reflete a dispersão de um conjunto de dados, caracterizando a confiabilidade deste conjunto (Tabela 1). Desse modo, esta estatística também reflete o que se discute anteriormente, que ALTSAT apresenta menor dispersão nos valores em relação aos dados do marégrafo, possivelmente devido a suas correções.

Uma das justificativas para tal discrepância entre as técnicas dá-se pelo fato dos dados maregráficos necessitarem de correções nos movimentos verticais, ocasionados por marés terrestres, movimentos tectônicos, isostasia, efeitos de carga e movimentos artificiais (induzidos pelo Homem), que por sua vez, influenciam diretamente nos registros maregráficos. As correções dos efeitos relacionados aos movimentos verticais podem ser realizadas a partir de técnicas geodésicas espaciais ou de modelos de recuperação pós-glacial (BARBOSA, 2005).

Os valores de máximo e mínimo de discrepância (0,040 m e -0,041 m, respectivamente) foram identificados nos picos correspondentes a agosto de 2015 e janeiro de 2016 (Figura 8 e Tabela 1). Logo, reafirma-se que pode ter sofrido influências de efeitos climáticos anômalos (KAYANO et al., 2016).

Apesar das diferenças entre as duas técnicas apresentarem valores na ordem centimétrica, a média de todas as discrepâncias, entre as duas técnicas, foi apenas 4 mm (Figura 8 e Tabela 1). Além disso, identifica-se que ambas as técnicas apresentaram valores de média e mediana aproximadas (Figura 8 e Tabela 1). De forma geral, os valores do NMM encontrado em ambas as técnicas condizem com a cota média de 6,342 m, indicada no relatório da RMPG (IBGE, 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi obtido o NMM por meio das técnicas de ALTSAT e maregrafia para a estação maregráfica de Fortaleza-CE (EMFOR), tendo-se como finalidade avaliar a qualidade do NMM a partir dos dados da missão CryoSat-2. Por meio dos resultados, pode-se verificar que a técnica ALTSAT apresentou valores coerentes com os dados de maregrafia. Logo, esta poderá ser empregada em alternativa a instalação de estações maregráficas.

Na análise comparativa, os dados apresentam conformidade com o valor médio do nível do mar de 6,342 m, indicado pelo relatório da RMPG (IBGE, 2016), sendo a média obtida por ALTSAT de 6,342 m e 6,345 m para os dados maregráficos.

Algumas divergências identificadas devem-se ao fato da não aplicação, proposital, de filtros e correções nos dados provenientes do marégrafo EMFOR, onde foram realizados apenas procedimentos de exclusão de valores espúrios e *outliers*, visando comparar as técnicas ALTSAT e os dados brutos de maregrafia na estimativa do NMM.

Fica evidente algumas vantagens na utilização da técnica ALTSAT. A primeira se refere a possibilidade de um monitoramento do nível do mar em caráter global, sem a necessidade da instalação de marégrafos. Outra vantagem corresponde ao fato de os dados serem gratuitos e acrescidos de correções geofísicas e eletromagnéticas (AVISO, 2021). Logo, as observáveis ALTSAT se apresentam como uma ótima alternativa para a obtenção de informações sobre o comportamento recente do NMM.

É importante considerar que neste estudo se utilizou apenas dados da missão CryoSat-2. Para mais análises do NMM seria interessante aumentar a quantidade de observações mediante a utilização de outras missões, como, Sentinel-3 considerando assim, a variabilidade da região (DALAZOANA; LUZ; FREITAS, 2005; SILVA; FREITAS, 2019). Diante do exposto, recomenda-se para trabalhos futuros que seja investigada a relação entre dados multimissões de satélites altimétricos e dados maregráficos devidamente corrigidos, principalmente, de movimentos verticais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSEN, O. B.; KNUDSEN, P.; STENSENG, L. **The DTU13 MSS (mean sea surface) and MDT (mean dynamic topography) from 20 years of satellite altimetry**. In: JIN S.; BARZAGHI, R. (ed). International Association of Geodesy Symposia, v. 144. Springer 2015. DOI: https://doi.org/10.1007/1345_2015_18.

AVISO - ARCHIVING, VALIDATION AND INTERPRETATION OF SATELLITE OCEANOGRAPHIC DATA. **Mean Sea Level**. Disponível em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. Acesso em: setembro de 2021.

BARBOSA, S. A. **Sea Level Change in the North Atlantic from Tide Gauges and Satellite Altimetry**. Tese (Doutorado em Ciências) Universidade do Porto, 2005.

BIROL, F.; BRANKART, J. M.; CASTRUCCIO, F.; BRASSEUR, P.; VERRON, J. **Impact of Ocean Mean Dynamic Topography on Satellite Data Assimilation**. *Marine Geodesy*, v. 27, p. 59–78. 2004.

BOSCH, W. **Geodetic Application of Satellite Altimetry**. In: HWANG, C.; SHUM, C. K.; LI, J. C. (ed.). *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*. International Association of Geodesy Symposia, v. 126, p. 3-21. 2003.

BOUFFARD, J.; NAEIJE, M.; BANKS, C. J.; CALAFAT, F. M.; CIPOLLINI, P.; SNAITH, H. M.; WEBB, E.; HALL, A.; MANNAN, R.; FEMENIAS, P.; PARRINELLO, T. **CryoSat ocean product quality status and future evolution**. *Advances in Space Research*, v. 62, n. 6, p. 1549–1563. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.11.043>.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. 2018. **Análise da Estação Maregráfica de Fortaleza para Determinar as Variações do Nível do Mar**. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 461-470. 2018.

CAZENAVE, A.; NEREM, R.S. **Present-day Sea Level Change: Observations and Causes**. *Reviews of Geophysics*, v. 42, n. 3, p. 1-20. 2004.

CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; FU, L. L.; CALLAHAN, P. S. **Satellite Altimetry**. In: FU, L. L.; CAZENAVE, A. (ed.). *Satellite Altimetry and Earth Sciences*, Academic Press, p. 1– 13. 2001.

COELHO, A. L. **Método de Previsão de Maré Oceânica, Utilizando Análise Harmônica em Séries de 18,69 anos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP. 2016.

CRESSIE, N. **The Origins of Kriging**. *Mathematical Geology*, v. 22, n. 3, p. 239-252. 1990.

DAHER, V. B.; PAES, R. C. O. V.; FRANÇA, G. B.; ALVARENGA, J. B. R.; TEIXEIRA, G. L. G. **Extraction of Tide Constituents by Harmonic Analysis Using Altimetry Satellite Data in the Brazilian Coast**. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 32, p. 614–626. 2015.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C. **Estudos do MSL a Partir de Séries Temporais Maregráficas e de Altimetria por Satélites Visando a Integração da Rede Vertical Brasileira ao SIRGAS**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 57, n. 02, p. 140-153. 2005.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **CryoSat**. 2022. Disponível em: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/FutureEO/CryoSat. Acessado em: dezembro de 2022.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **CryoSat-2 Product Handbook**. 2023. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/CryoSat-Baseline-D-Product-Handbook.pdf/c76df710-2a5c-c8b8-00c1-13c8db0e9f51>. Acessado em: janeiro de 2023.

FERREIRA, Í. O. **Controle de Qualidade em Levantamentos Hidrográficos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **Coastal sea level from CryoSat-2 SARIn altimetry in Norway**. *Advances in Space Research*, v. 62, n. 6, p. 1344–1357, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.043>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro. 2016.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **El Niño e La Niña**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: maio de 2020.

JIANG, I.; NIELSEN, N.; ANDERSEN, O. B.; BAUER-GOTTWEIN, P. **A Bigger Picture of how the Tibetan Lakes Have Changed Over the Past Decade Revealed by CryoSat-2 Altimetry**. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 125, n. 23. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020JD033161>

KARIMI, A. A.; ANDERSEN, O. B.; DENG, D. **Mean Sea Surface and Mean Dynamic Topography Determination from Cryosat-2 Data around Australia**. *Advances in Space Research*. v. 68, n. 2. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.01.009>.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. J. P. **El Niño e La Niña dos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos**. *Revista Climanalise - Edição Comemorativa de 30 anos*. 2016.

KUCZYNSKA-SIEHIEN, J.; LYSZKOWICZ, A.; STEPNIAK, K.; KRUKOWSKA, M. **Determination of Geopotential Value W_0^L at Polish Tide Gauges from GNSS Data and Geoid Model**. *Acta Geodaetica Geophys.* v. 52, p. 527-534. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40328-016-0188-y>.

LIEBSCH, G.; NOVOTNY, K.; DIETRICH, R.; SHUM, C. K. **Comparison of Multimission Altimetric Sea-Surface Heights with Tide Gauge Observations in the Southern Baltic Sea**. *Marine Geodesy*, v. 25, n. 3, p. 213–234. 2010.

LUZ, R. T. **Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2008.

MARTINS, E. S. P.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. **O Clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: Monitoramento e Previsão**. Parcerias Estratégicas, v. 22, n. 44, p. 63-69. 2017.

MATHERON, G. **Kriging or Polynomial Interpolation Procedures**. CIMM Transactions, v. 70, p. 240-244. 1967.

MOHAMMADI, K.; GOUDARZI, N. **Study of Inter-Correlations of Solar Radiation, Wind Speed and Precipitation Under the Influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California**. Renewable Energy, v. 120, p. 190-200. 2018.

MOLODENSKY, M. S. **New Methods of Studying the Figure of the Earth**. Bulletin Géodésique, v. 50, n. 1, p. 17-21. 1958. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02537957>

NEREM, R. S.; MITCHUM, G. T. **Sea level change**, In: FU, L. L.; CAZENAVE, A. (ed.). Satellite Altimetry and Earth Sciences, Academic Press, p. 329-349. 2001.

NEREM, R. S.; MITCHUM, G. T. **Estimates of Vertical Crustal Motion Derived from Differences of TOPEX/POSEIDON and Tide Gauge Sea Level Measurements**. Geophysical Research Letters, v. 29, n. 19, p. 40-41. 2002.

PAJAK, K.; KOWALCZYK, K.A. **Comparison of Seasonal Variations of Sea Level in the Southern Baltic Sea from Altimetry and Tide Gauge Data**. Advances in Space Research, v. 63, n. 5, p. 1768-1780. 2019.

REIS, V. P.; PALMEIRO, A. S.; BARBOSA, L. G. **Estudo da obtenção do Nível Médio do Mar com altimetria por satélites**. Revista Brasileira de Geomática, v. 6, n. 1, p. 3-22. 2018.

ROSMORDUC, V.; BENVENISTE, J.; BRONNER, E.; DINARDO, S.; LAURET, O.; MAHEU, C.; MILAGRO, M.; PICOT, N.; AMBROZIO, A.; ESCOLÀ, R.; GARCIA-MONDEJAR, A.; RESTANO, M.; SCHRAMA, E.; TERRA-HOMEM, M. 2016. **Radar Altimetry Tutorial: BRAT - Broadview Radar Altimetry Toolbox**, 357p.

SCAGLIOLA, M.; FORNARI, M.; BOUFFARD, J.; PARRINELLO, T. **Measured CryoSat SAR/SARIn Signal to Noise Ratio from in-orbit acquisitions**. Anais da XX EGU General Assembly Conference Abstracts, p. 6751. 2018.

SILVA, L. M.; FREITAS, S. R. C. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. Revista Cartográfica, n. 98, p. 33-57. 2019.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy, 2^oed Completely Revised and Extended Edition**. Berlin, Walter de Gruyter GmbH; Co. KG. 2003.

WOODWORTH, P. L.; PLAYER, R. **The Permanent Service for Mean Sea Level: An Update to the 21st Century**. Journal of Coastal Research, v. 19, n. 2, p. 287-295. 2003.

CAPÍTULO 3. VALIDAÇÃO DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE PARA OBTENÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR EM ESTAÇÕES MAREGRÁFICAS NA COSTA BRASILEIRA

Resumo

Observações provenientes de marégrafos têm sido a principal técnica para a determinação local do Nível Médio do Mar (NMM). Contudo, o manutenção de longas séries temporais pode se tornar impraticável, seja pela dificuldade técnica ou falta de recursos financeiros para a instalação de marégrafos. Neste sentido, novas tecnologias no campo da geodésia têm permitido aperfeiçoar e complementar as antigas medições pontuais realizadas por marégrafos. Face o exposto, o objetivo deste capítulo é propor e analisar uma metodologia para determinar o NMM a partir de dados de Altimetria por Satélite (ALTSAT) para a costa brasileira. Para este propósito, utilizou-se observações da missão CryoSat-2 (CS-2) e dados das estações maregráficas de Fortaleza – CE (EMFOR), Salvador – BA (EMSAL), Macaé – RJ (EMMAC) e Imbituba – SC (EMIMB), todas pertencentes à Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia (RMPG) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com uma série temporal de 9 anos (2011-2020). No que se refere a determinação do NMM por ALTSAT, foi utilizado o *freeware* BRAT versão 4.2.1 para extrair os parâmetros necessários e devido ao espaçamento das trilhas de dados da missão CS-2, foi aplicado o interpolador estatístico Krigagem Universal de forma a preencher as lacunas. Em relação aos dados por maregrafia, eliminou-se os *outliers* e utilizou-se o *software* PACMARÉ para executar a previsão harmônica das marés e completar os dados ausentes, além da aplicação do filtro de Godin para suavização. Por fim, foram analisadas estatisticamente as discrepâncias mensais do NMM entre as técnicas para cada estação. Numa análise comparativa entre ambas as técnicas, identificou-se uma discrepância média de 01 mm em EMFOR, 03 mm em EMSAL, 19 mm em EMMAC e 04 mm em EMIMB. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta é viável e pode ser empregada como alternativa ao uso de estações maregráficas, reduzindo as onerações de levantamentos *in loco*.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com McGoogan et al. (1974), obter a real forma da Terra foi o principal objetivo da Altimetria por Satélite (ALTSAT) e foi conceitualmente prevista nos anos de 1960.

O Estados Unidos lançou em 14 de maio de 1973, pelo foguete Saturn V, o primeiro altímetro a bordo do satélite Skylab. Esta primeira missão foi precursora para o desenvolvimento dos sistemas ALTSAT, tendo como sequência as missões: GEOS-3, em 1975; Seasat, em 1978 e Geosat, em 1985.

Já no final da década de 1980 o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) consolidaram uma parceria e investiram em projetos em conjunto, que resultaram no lançamento das missões TOPEX/Poseidon (1992), Jason-1 (2001) além do Jason-2 (2008) e Jason-3 (2016) que contaram com a parceria do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) (VIGNUDELLI et al., 2011; ESA, 2018).

A Agência Espacial Europeia (do inglês, *European Space Agency* - ESA) foi responsável pelo lançamento dos satélites ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), Envisat (2002), CryoSat (2005), CryoSat-2 (2010), Sentinel-1 (2014), Sentinel-2 (2015), Sentinel-3A (2016) e Sentinel-3B (2018), Sentinel-5P (2017), Sentinel-6 (2020). A missão CryoSat-2 foi a primeira missão da Europa dedicada a medir a espessura do gelo na terra e no mar, a fim de fornecer informações precisas para monitoramento das camadas de gelo da Groelândia e Antártica. O CryoSat-2 (CS-2) também é capaz de mapear o nível do mar próximo à costa e alvos de águas interiores, como pequenos lagos e rios (ESA, 2023).

O desenvolvimento tecnológico pôde proporcionar, nestes últimos 40 anos, um crescimento significativo de missões lançadas e um aumento na precisão espacial dos dados obtidos por ALTSAT. Além disso, uma série de avanços possibilitou a ampliação das aplicações desta ciência, como, estudos em camadas de gelo, oceanográficos, hidrológicos, dentre outros, aumentando as perspectivas de amplos estudos com os lançamentos das futuras missões.

Isto posto, desperta-se o interesse em testar e aprimorar novas propostas para a aplicação dos dados ALTSAT. Trabalhos realizados ao nível internacional, apresentam viabilização de metodologias e análises do uso da ALTSAT em auxílio a dados maregráficos. Pode-se citar: Idžanović, Ophaug e Andersen (2017); Dinardo et al. (2018); Idžanović, Ophaug e Andersen (2018); Gómez-Enri et al. (2018); Zaron (2018); Kleinherenbrink et al. (2020).

Com o intuito de investigar o *Mean Dynamic Topography* - Topografias do Nível Médio do Mar (MDT) do CS-2, Idžanović, Ophaug e Andersen (2017) o contrapôs com três modelos geodésicos de MDT costeiros da Noruega e observações de marégrafos. Inferiram que os dados

do CS-2 são promissores, em relação a altimetria convencional, apresentando uma concordância de 3 a 5 cm com MDT provenientes de maregráfos na Costa da Noruega.

Dinardo et al. (2018) quantificaram a qualidade do nível do mar através do altímetro *Synthetic Aperture Radar* (SAR) do CS-2 para distâncias menores que 10 km da costa da Baía Alemã e no Mar Báltico Ocidental. Os dados ALTSAT foram comparados com modelos locais e regionais da área de interesse entre julho de 2010 a março de 2016. A anomalia do nível do mar (*Sea Level Anomaly* - SLA) apresentou uma concordância de 4 cm de desvio padrão ao validar com dados in situ. Logo, a análise mostra que a altimetria SAR é capaz de medir a média mensal do nível do mar na zona costeira da região de interesse.

Através de estudo comparativo, Idžanović, Ophaug e Andersen (2018) analisaram observações do nível do mar a partir de séries temporais de SLA do CS-2 com dados de 22 marégrafos ao longo da costa norueguesa e sob condições topográficas difíceis (por exemplo, em fiordes). Os resultados do CS-2 apresentaram desvios padrão e discrepância de 61% e 16 cm, respectivamente. Ao aplicar correções barométricas e marés locais, apresentou uma melhoria de 24% com 12,2 cm.

Gómez-Enri et al. (2018) avaliaram as medições do nível do mar realizadas na plataforma oriental do Golfo de Cádiz (sudoeste da Península Ibérica). Utilizaram séries temporais agosto de 2010 a dezembro de 2014 de SLA oriundos dos altímetros dos CS-2 e AltiKa (altímetro da banda Ka), comparados a duas estações maregráficas localizadas ao longo da costa espanhola, na área de estudo. Em geral, os dados SLA do CS-2 melhor concordaram com os dados da EM Huelva apresentando um *Root Mean Square* (RMS) de 6,4 a 11,4 cm e na EM Bonanza variaram de 14,6 a 16,8 cm. Concluíram que a qualidade da altimetria SAR é comparável ou até um pouco melhor que a altimetria convencional, qualificando-os para exploração em estudos oceanográficos e monitoramento do nível do mar.

Zaron (2018) desenvolveu um modelo empírico para marés no Mar de Weddell (localizado na Península Antártica), usando dados da missão CS-2. O modelo de maré proposto foi validado comparando-o com dados do Sistema de Posicionamento Global (do inglês, *Global Positioning System* – GPS), medições maregráficas e com modelos de marés existentes: *Goddard/Grenoble, versão 4.10c* (GOT4.10c) e *Circum-Antártic Tidal Simulation* (CATS2008). Os resultados indicam que o CS-2 se apresentou uma fonte de dados útil para futuros modelos de marés, além de que as marés derivadas desta missão foram consistentes com estimativas anteriores e algumas componentes harmônicas foram mais precisas do que outros modelos.

Já Kleinherenbrink et al. (2020) aplicaram o algoritmo *Fully-Focussed SAR* (FF-SAR) aos dados do CS-2, que é capaz de reamostrar a resolução espacial. O experimento se deu em lagos e canais na Holanda, e foram validados com dados maregráficos. Demonstraram que o processamento com o FF-SAR é capaz de resolver e medir pequenas valas de apenas alguns metros de largura alcançando uma precisão de 2 a 11 cm.

No Brasil tem-se poucos estudos relacionados a esta tecnologia, podendo-se citar Souza e Ferreira (2021) que analisaram a variabilidade da Topografia do Nível "Médio" do Mar (TNMM) a partir de dados CS-2 e estações maregráficas. Encontraram resultados que explicitaram uma discrepância anual milimétrica, entre as técnicas em todas as estações maregráficas avaliadas.

Ainda num cenário atual, existe uma carência de estudos nacionais sobre este tema, fato que justifica qualquer pesquisa desta natureza. No Brasil a principal técnica para a determinação das variações de maré são observações provenientes de marégrafos. Todavia, se torna impraticável manter marégrafos com a finalidade de obter longas séries temporais, seja pela dificuldade técnica ou falta de recurso financeiro. Além disso, o NMM é utilizado para referenciar as altitudes dos pontos costeiros, como referenciais verticais terrestres e base para definição de outros níveis hidrográficos (SANANTA; DALAZOANA, 2020).

Neste capítulo, visou-se aplicar aperfeiçoamentos na metodologia inicial proposta no capítulo 2. Para a definição do NMM, adicionou-se a anomalia do nível do mar (SLA) nos dados altimétricos, suavização (filtro de Godin) e aplicação de correções nos dados de maregrafia. Com a finalidade de avaliar a funcionalidade e aplicabilidade da metodologia proposta em diferentes locais, fez-se uso de quatro estações maregráficas localizados ao longo da costa brasileira em uma série temporal de 2011 a 2020.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, fez-se uso de quatro estações maregráficas pertencentes a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) em que seus dados são disponibilizados gratuitamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Utilizou-se como critério de seleção que as estações estivessem em área costeira com influência, predominante, de maré oceânica, além de dados disponíveis em no mínimo cinco anos contínuos. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geodésicas (SIRGAS2000) aproximadas e a disponibilidade de dados das estações selecionadas. A Figura 1 apresenta a distribuição espacial das estações, pela costa brasileira.

Tabela 1 – Coordenadas aproximadas das estações.

Estação	Local	Latitude	Longitude	Dados
EMFOR	Fortaleza-CE	-03°42'52"	-38°28'36"	2009-2021
EMSAL	Salvador-BA	-12°58'26"	-38°31'02"	2008-2021
EMMAC	Macaé-RJ	-22°23'08"	-41°46'10"	2002-2015
EMIMB	Imbituba-SC	-28°13'52"	-48°39'02"	2002-2021

Fonte: Adaptado de IBGE (2021).

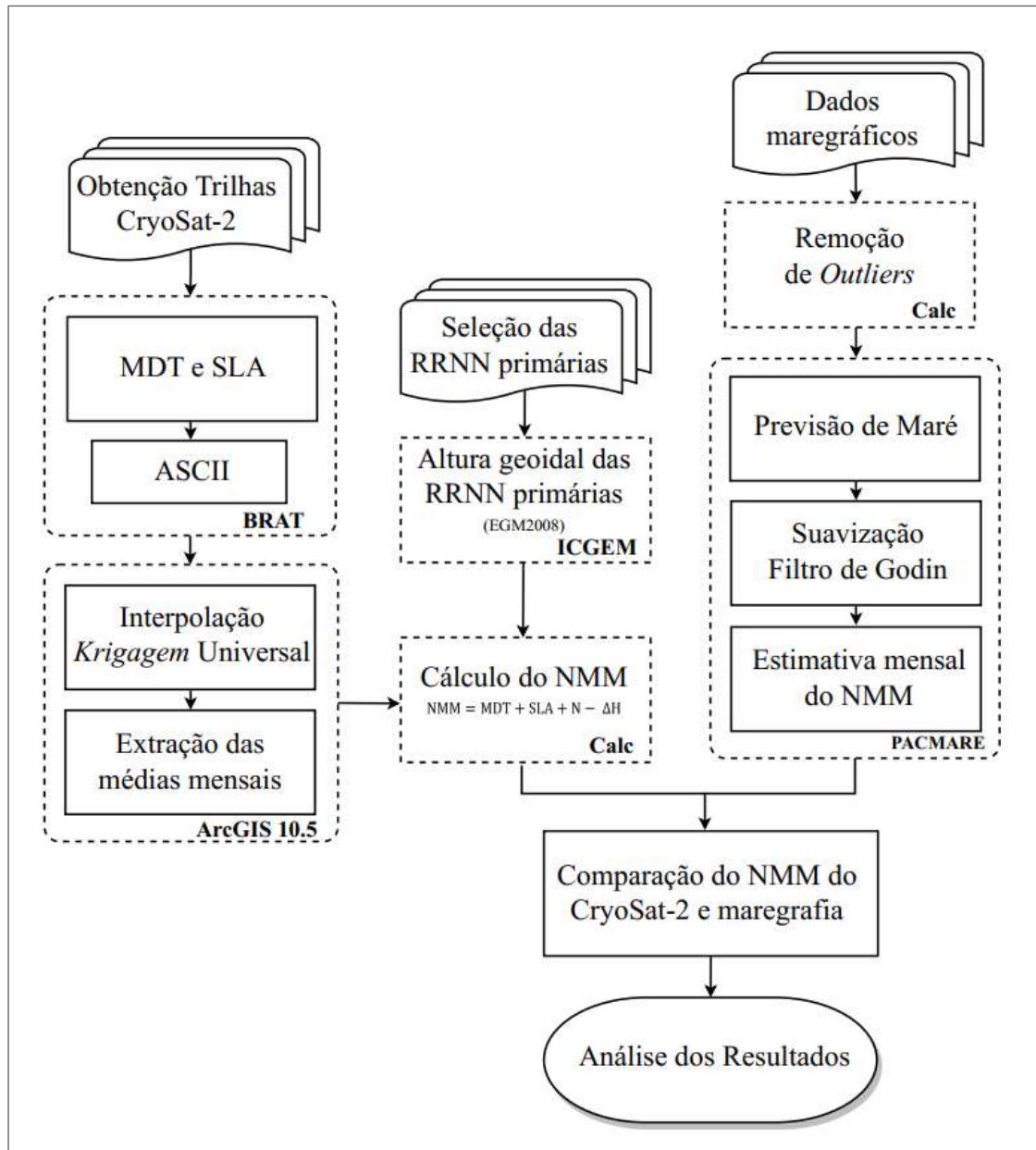
Figura 1 – Localização das estações maregráficas pertencentes a RMPG.



Fonte: Autora.

Para um melhor entendimento, apresenta-se, em resumo, um fluxograma (Figura 2) com os principais passos da metodologia abordada.

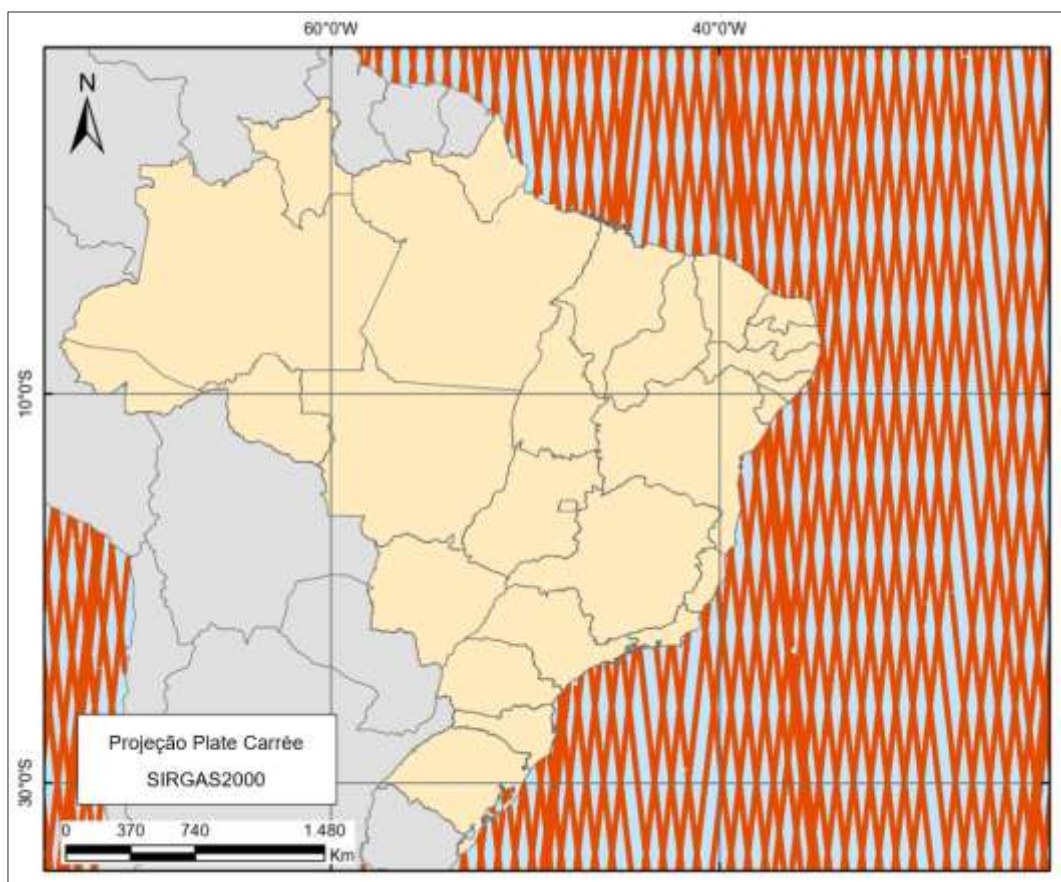
Figura 2 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autora.

Os dados de Altimetria por Satélite são provenientes da missão CryoSat-2 (CS-2). Cujas escolhas se deu devido a sua disponibilidade de dados (2011 a 2020) e, principalmente, por ser uma missão que apresenta uma potencialidade no mapeamento do nível do mar próximo à costa (IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2017; ESA, 2020), local alvo deste estudo. A Figura 3 apresenta as trilhas do CS-2 obtidas no mês de julho do ano de 2018.

Figura 3 – Amostra das trilhas da missão CryoSat-2.



Fonte: Autora.

Os dados de *Mean Dynamic Topography* (MDT) e *Sea Level Anomaly* (SLA) foram adquiridos por meio do sítio do *Copernicus Marine and Environment Monitoring* (CMEMS), onde são disponibilizados arquivos criptografados em formato .nc (*Network Common Data Form* - NetCDF). Desta forma, fez-se necessária a utilização de um *software* específico, o *freeware Broadview Radar Altimetry Toolbox* (BRAT) - versão 4.2.1, para a extração da Latitude, Longitude, MDT e SLA das regiões de interesse. Os dados ALTSAT são referenciados ao modelo geopotencial global EGM2008 e abrangem o período de fevereiro de 2011 a julho de 2020. A Estação EMMAC (Macaé – RJ) foi desativada em dezembro de 2015, logo, apenas os resultados desta Estação Maregráfica (EM) são referentes ao período de fevereiro de 2011 a dezembro de 2015.

Ao mapear as marés oceânicas com satélites deve-se considerar o espaçamento das trilhas no solo em relação às escalas horizontais do campo de elevação de maré, além da quantidade de registro dos dados. A órbita do CS-2 tem um longo período de repetição, que cobre a Terra com uma matriz de 10.688 faixas terrestres ascendentes e descendentes. O espaçamento entre trilhas diminui com a latitude, permitindo que as regiões polares sejam

mapeadas com alta resolução espacial (ZARON, 2018). Devido o CS-2 não possuir dados diários, foi mandatório interpolar os dados não amostrados empregando um interpolador geoestatístico e extrai-los mensalmente. Para isto, os dados foram importados no *software* ArcGIS, versão 10.5, (licença do Departamento de Engenharia Civil – DEC, da Universidade Federal de Viçosa - UFV) e aplicado a interpolação por Krigagem. Elegeu-se este, em virtude de apresentar estimativa com tendência e variância mínima (MATHERON, 1967; CRESSIE, 1990; FERREIA, 2018).

A partir da localização de cada EM da RMPG buscou-se no Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE as coordenadas das RRNN primárias e RRNN vizinhas às estações, de modo a obter as alturas geoidais das RRNN através do sítio *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM⁶), referenciadas ao EGM2008.

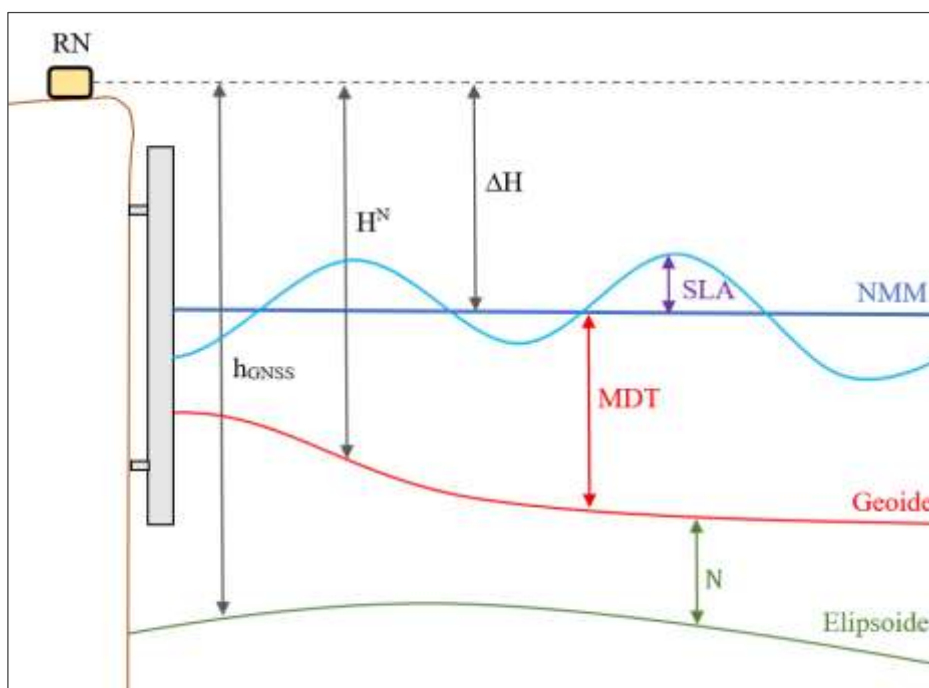
A altura geoidal é primordial para a compatibilização entre as superfícies de referências das técnicas ALTSAT e maregrafia. Uma vez que, as observações da ALTSAT são relacionadas a um elipsoide e modelo geopotencial global, já a maregrafia mensura as variações do nível do mar em relação à um referencial local e estão relacionadas a estações geodésicas (GNSS). Deste modo, é fundamental padronizar as superfícies de referências de ambas técnicas. (PAJAK; KOWALCZYK, 2019). Contudo, a compatibilização entre as superfícies é complexa, em razão dos dados não se referirem ao mesmo sistema de referência (LIEBSCH et al., 2010). Uma solução é apresentada por Pajak e Kowalczyk (2019), para integrar as diferentes superfícies e obter o NMM, aplica-se a Equação 1 junto aos dados ALTSAT:

$$NMM = MDT + SLA + N - \Delta H \quad (1)$$

A diferença entre altura da Referência de Nível (RN) primária (vizinha) até o nível médio local do marégrafo (valor extraído do BDG e F-41 da DHN) corresponde ao ΔH . A Figura 4 ilustra as superfícies de referência utilizadas nas técnicas de maregrafia e ALTSAT.

⁶ <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>

Figura 4 – Relação entre as superfícies de referência.



Fonte: Adaptado de Fu e Cazenave (2001) e Seeber (2003).

Os dados do CS-2 são ofertados com diversas correções, em contrapartida, os dados de maregrafia são disponibilizados após formatação dos arquivos e filtragem simples dos dados brutos (IBGE, 2016). Visando uma melhor compatibilização dos dados analisados, foi realizada a eliminação de *outliers*, previsão dos dados de maré faltantes e a suavização das observações maregráficas das estações da RMPG.

Uma observação é considerada *outlier* quando esta apresenta um grande afastamento de valores em relação as demais observações. Segundo Amorim (2004), Melo e Castro (2013) citando Gaspary (2000), *outliers* são resíduos que, estatisticamente, diferenciam-se do conjunto de dados ao qual pertencem. Estes autores ainda afirmam que, geralmente, os *outliers* são causados por erros grosseiros ou fenômenos até então desconhecidos. Assim, ao se detectar um *outlier*, deve-se verificar, tentar corrigir ou então descartar tal observação (SANTOS et al., 2016a).

Como todos os dados maregráficos seguem uma distribuição normal, a detecção de *outliers*, neste capítulo, foi realizada pelo teste do 3σ . Este teste baseia-se na média (μ) e desvio padrão (σ) do conjunto de dados, além disso, em termos de esperança matemática têm-se uma probabilidade de ocorrência cerca de 99,7 % dos dados. Isto posto, uma observação é considerada como contaminada se o módulo do seu valor for maior que a soma do módulo da média da amostra com 3 vezes seu desvio padrão (NERO, 2005).

$$|\text{Observação}| < |\text{Média } (\mu)| + 3 * \sigma \quad (2)$$

As informações maregráficas, das estações pertencentes a RPMG, apresentam falhas e/ou ausência nos dados, devido aos diversos períodos de inatividade das estações e falhas nos sensores (IBGE, 2016). Com o intuito de contornar estas falhas, utilizou-se os módulos ANALEXEC e PREVISÃO do *software* PACMARÉ (FRANCO, 2009).

A partir do módulo ANALEXEC é possível realizar a análise harmônica e obter as constantes harmônicas da maré. Estas constantes estão relacionadas fisicamente ao processo de geração da maré, fundamentadas em ondas sinusoidais com frequência determinada pelo efeito exclusivo da ação de forças astronômicas, ou seja, a interação entre o Sol, a Lua e a Terra, no local de observação. A literatura infere que, empregando uma série correspondente ao ciclo nodal lunar (>18,6 anos), pode-se definir um valor verdadeiro para cada constante. Entretanto, na prática, utilizam-se geralmente períodos inferiores a um ano e superiores a um mês, produzindo-se assim componentes aproximadas do valor verdadeiro. Para a análise harmônica, considerou-se um período mínimo de 32 dias, conforme recomendações da DNH através da NORMAN-25 (DHN, 2017).

O módulo PREVISÃO utiliza os parâmetros significativos, estáveis no tempo, das componentes harmônicas para gerar estimativas das previsões de maré. De posse das previsões de maré, foi possível preencher as observações faltantes para cada EM em estudo. Maiores informações sobre análises harmônicas e previsão de maré podem ser encontradas em Pugh (1987) e Franco (2009).

Posteriormente, estimou-se o NMM para cada EM com auxílio do módulo NIMED, também do pacote PACMARÉ. Para a definição do NMM se faz necessário suavizar os dados adotando o filtro passa-baixa de Godin ou de Thompson. Optou-se por empregar o filtro de Godin, que consiste em um filtro de simples implementação, no qual corrige a tendenciosidade dos dados e se baseia na aplicação de três médias móveis. Porém, como desvantagem ele amortece excessivamente as oscilações de frequências inferiores à banda diurna, em cerca de 40% (COSTA, 2010). Destarte, as previsões de marés são essenciais para a aplicação dos filtros de Thompson e/ou Godin, pois o módulo NIMED aplica-os apenas no caso em que não haja dados faltantes.

A análise dos dados foi computada a partir da série temporal dos valores mensais do NMM obtido pelos dados do CS-2 validados por dados maregráficos das estações da RPMG. Recorreu-se a metodologias da estatística descritiva para análise das variações do NMM em ambas as técnicas estudadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados baseiam-se nas análises em função da discrepância, estatísticas descritivas e comportamento do NMM em ambas as técnicas, de acordo com a proposta deste capítulo. Para a apresentação dos resultados, foram gerados gráficos em unidade métrica e elaborados em diferentes escalas a fim de melhor ilustrar as particularidades de cada EM. Vale ressaltar que a estação de Macaé (EMMAC) abrange o período de 2011 até 2015, já as demais contemplam de 2011 até 2020, conforme explicitado anteriormente. Os resultados referentes as estatísticas das técnicas ALTSAT e maregrafia, estão apresentados em escala métrica (m) na Tabela 2. A seguir, a Figura 5 ilustra as variações mensais em EMFOR.

Tabela 2 – Resumo das estatísticas descritivas em metros.

Estação	Estatística	ALTSAT (m)	RMPG (m)	Discrepância entre técnicas (m)	NMM IBGE (2021) (m)
EMFOR	Média	6,349	6,348	0,001	6,343
	Amplitude	0,088	0,080	0,008	
	Desvio Padrão	0,021	0,017	-	
EMSAL	Média	7,283	7,286	0,003	7,289
	Amplitude	0,176	0,183	0,007	
	Desvio Padrão	0,039	0,042	-	
EMMAC	Média	1,368	1,387	0,019	1,364
	Amplitude	0,186	0,227	0,041	
	Desvio Padrão	0,041	0,054	-	
EMIMB	Média	1,603	1,607	0,004	1,602
	Amplitude	0,276	0,277	0,001	
	Desvio Padrão	0,070	0,068	-	

Fonte: Autora.

Figura 5 – Médias mensais para EMFOR.



Fonte: Autora.

Borges (2017), afirma que entre 2012 e 2017 o Nordeste sofreu com período de chuvas irregulares, atingindo níveis críticos de seca e cheia. Esta informação é refletida diretamente nas subidas e quedas acentuadas verificadas exatamente neste período. Em ambas as técnicas, em modo geral os picos foram identificados próximos ao meio do ano, sendo os mais evidenciados em 2013, 2015, 2017 e 2019. Estes picos podem estar relacionados ao período com maior recorrência de chuvas no Ceará, de fevereiro a maio (MONTEIRO; ZANELLA, 2019).

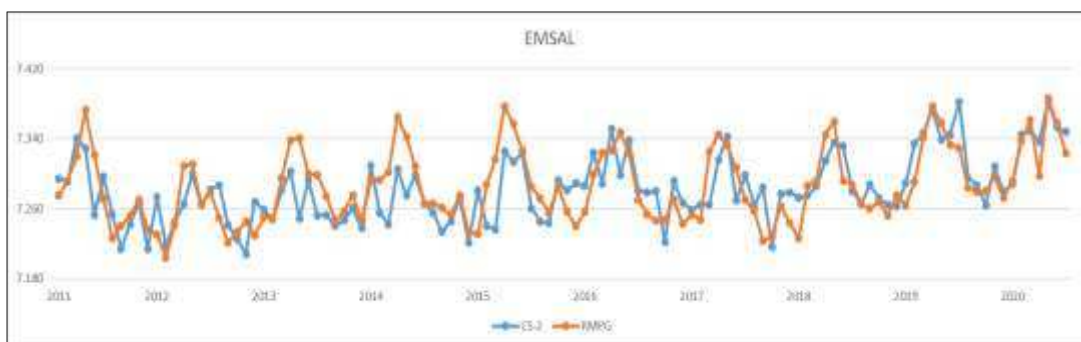
Em relação a todo o período considerado, um padrão nas discrepâncias entre as técnicas foi observado, sendo as maiores encontradas entre os meses de abril, maio e junho, e as menores entre agosto, setembro e outubro. Destacando, as maiores em 5/2013 e 12/2019 com 0,042 m e as menores em 09/2011, 08 e 10/2015 com 0,001 m.

De acordo com a Figura 5, ao analisar as tendências do nível do mar observadas por ambas as técnicas, verifica-se que os dados de ALTSAT indicam uma tendência de aumento e a maregrafia um leve decréscimo. Ademais, a Tabela 2 apresenta a média do nível do mar, em que ALTSAT mostrou-se apenas 2 mm acima do nível obtido por maregrafia, logo, ambas as técnicas apresentaram valores semelhantes. Por sua vez, o relatório do IBGE (2021) evidencia a média do NMM em EMFOR com 6,343 m e uma tendência de +1,3 mm/ano (dados de 2008-2019). Outros autores, como, Calado, Garnes e Jamur (2020) encontraram uma média de 6,341 m em EMFOR, com 10 anos de dados, sendo coerentes com resultados encontrados para esta EM e neste estudo, em ambas as técnicas.

A amplitude é dada pela diferença nos valores de máximo e mínimo dos dados, já o desvio padrão reflete as variações dos valores do NMM em torno de sua média. Isto posto, observa-se que a técnica ALTSAT apresentou maior amplitude do que a maregrafia, em decorrência da maior amplitude o desvio padrão também foi maior do que a maregrafia. No entanto, a diferença entre os valores de amplitude entre as duas técnicas foram 8 mm. Expondo que apesar do ALTSAT ter apresentado maiores valores de desvio padrão e amplitude, a diferença entre as técnicas foi pequena.

A Figura 5 apresenta as variações mensais em EMSAL.

Figura 6 – Médias mensais para EMSAL.



Fonte: Autora.

As máximas discrepâncias ocorrem em geral nos meses 03, 04 e 05, destacando 0,093 m em 05/2013. Em sequência, nos meses 06, 07 e 08 evidencia-se as menores discrepâncias, notabilizada com 0,0004 m em 07/2014. Os picos são observados em todos os anos, próximos aos meses de abril e maio, e as quedas, em sua maioria, se fazem presentes entre dezembro e janeiro. Santos et al. (2016b) expõe que o período de abril a julho representa o maior volume de chuvas em Salvador-BA, e a estação de seca é compreendida entre setembro e dezembro. Logo, estas informações encontram-se em conformidade com os resultados apresentados nas duas técnicas em questão.

Segundo o relatório da Defesa Civil de Salvador (CODESAL, 2020), o período de março a junho de 2020, registrou os maiores índices pluviométricos dos últimos 36 anos. Fato este, que corrobora com o aumento dos valores do nível do mar observados no ano de 2020, evidente em ambas as técnicas.

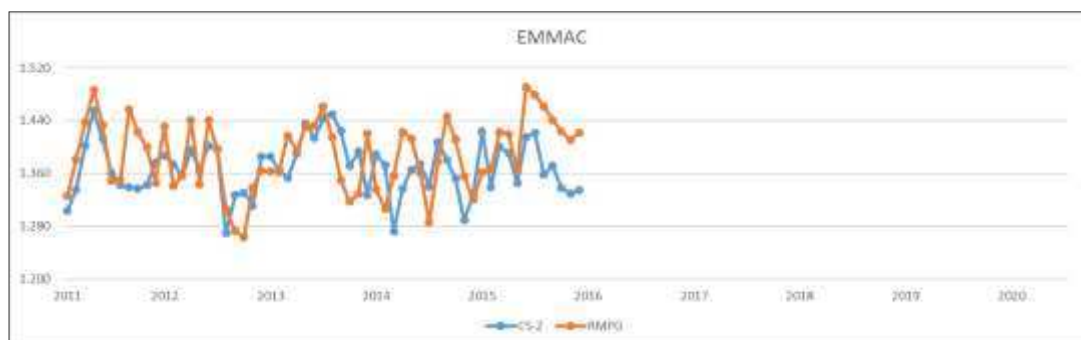
Como pode ser visto na Tabela 2, as estatísticas da maregrafia foram maiores que as de ALTSAT. Assim, refletindo as diversas correções inseridas em ALSAT, que proporcionam menores dispersões. As diferenças entre as técnicas se mantiveram próximas, sendo 7 mm na amplitude e 3 mm na média e desvio padrão. Em concordância, tanto as médias quanto a tendência apresentaram um aumento do NMM, em ambas as técnicas, e foram coerentes com as informadas pelo IBGE (2021), sendo 7,289 m com uma taxa de variação de 2,70 mm/ano (dados de 2004 até 2020).

É importante salientar, que em 2015-2016 foi identificado a ocorrência do fenômeno oceânico-atmosférico *El Niño*, classificada com intensidade forte, e em 2017-2018 *La Niña*, com intensidade moderada (INPE, 2020). Estas anomalias climáticas são responsáveis pelo aquecimento e resfriamento da camada mais superficial do Oceano Pacífico, provocando, respectivamente, severas secas e chuvas intensas na região Nordeste do Brasil (KAYANO et

al., 2016; MOHAMMADI; GOUDARZI, 2018). À vista disso, tais efeitos podem ter afetado o nível do mar observado, principalmente em EMFOR e EMSAL.

A Figuras 7, ilustra as variações mensais em EMMAC.

Figura 7 – Médias mensais para EMMAC.



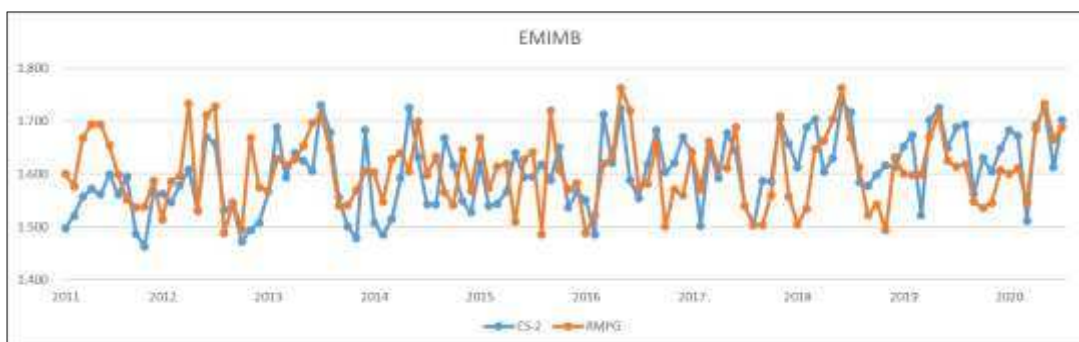
Fonte: Autora.

Ao analisarmos os resultados de EMMAC, é possível verificar que as maiores discrepâncias se concentram nos últimos meses de cada ano, destacando-se com 0,119 m em 09/2011 e a menor foi em 03/2015 com 0,0001 m, por sua vez, as menores não exibiram uma padronização. Da mesma forma, os picos e as quedas não seguiram um padrão, no entanto, verifica-se que as técnicas se acompanham, ou seja, apresentam picos e quedas próximos. Apesar das maiores chuvas ocorrem de novembro a março, não foi possível identificar este parâmetro nos resultados encontrados.

Em relação a demais estações, EMMAC foi a única que apresentou maiores diferenças nas estatísticas descritivas, principalmente na maregrafia. Além do mais, a maregrafia (1,387 m) destoou cerca de 0,023 m da média do NMM obtida pelo IBGE (1,364 m). Apesar das diferenças, a técnica ALTSAT evidenciou melhores resultados e menores variações durante a pequena série temporal, como também expressou maior proximidade ao NMM do IBGE (2021), em comparativo com a maregrafia.

Nota-se pela Figura 7 uma tendência positiva para a maregrafia e negativa para a ALTSAT. Esta tendência da maregrafia pode estar relacionada a subsidência de movimento vertical da crosta, na região de Macaé (IBGE, 2016; 2021), a qual não foi analisada neste estudo, logo, os dados maregráficos podem conter estes efeitos. Em EMMAC foi obtido uma variação do NMM de 4,9 mm/ano, segundo IBGE (2021). Lembrando que os dados ALTSAT não são contaminados por movimentos crustais.

Figura 8 – Médias mensais para EMIMB.



Fonte: Autora.

As maiores discrepâncias foram identificadas no segundo semestre dos anos analisados, destacando-se em 11/2012 com 0,175 m. A menor, com 0,004 m em 07/2017, porém as menores não apresentaram um padrão. Vale evidenciar, conforme SIEGA et al. (2017), os meses mais chuvosos em Imbituba-SC, são janeiro e fevereiro. Contudo, da mesma forma que EMMAC, os picos e quedas em EMIMB também não seguiram um padrão em relação ao período chuvoso.

É notório a variabilidade dos resultados expressos pelas duas técnicas avaliadas, em EMIMB, com maior oscilação para a maregrafia. Afirmativa que é evidenciada nas maiores amplitudes e maiores desvios padrões ao compararem com os valores das demais estações (Tabela 2).

Independentemente da média da maregrafia e ALTSAT exprimirem valores condizentes com a do relatório do IBGE, os dados indicam uma tendência de crescimento do NMM em ALTSAT e decréscimo para maregrafia. Esta tendência pode ser comparada com os resultados evidenciados por Silva e Freitas (2019) em que encontraram uma elevação do NMM de 2,4 mm/ano e uma taxa de subsidência de -3,02 mm/ano a partir de dados *Global Navigation Satellite System* (GNSS), distintas missões ALTSAT e maregrafia no período de 2007 até 2016. Esta taxa de subsidência discrimina os movimentos da crosta em relação ao nível do mar, assim, evidencia a influência de movimentos crustais em EMMIB. O IBGE (2021) apontou uma taxa de elevação do NMM de 5,1 mm/ ano (2001-2020), bem como, aponta uma significativa subsidência da crosta na região do marégrafo (GIEHL, 2020).

Vale pontuar que, EMIMB foi a única EM que sofreu múltiplas modificações em seus sensores analógicos mecânicos e digitais, posicionamento, referências, bem como, modificações nos padrões adotados pela RMPG. Outrossim, ocorreram diversas falhas instrumentais que ocasionaram lacunas consideráveis de ausência de dados, sendo realizada a recuperação e preenchimento de algumas lacunas de vários meses e disponibilizadas na página da RMPG (IBGE, 2021). Apesar do reprocessamento pelo IBGE, os dados ainda apresentaram

demasiadas lacunas, sendo necessário realizar a previsão das leituras e preencher os dados faltantes com o pacote PREVISÃO do PACMARÉ.

Em concordância aos relatórios do IBGE (2016; 2021), EMFOR e EMSAL apresentaram resultados favoráveis no Teste de *Van de Castele*, indicando que não houveram derivas significativas nos seus sensores eletrônicos, já em EMMAC e EMIMB apresentaram uma deriva acentuada (em seus sensores de pressão). O IBGE aplicou funções corretivas a fim de minimiza-las, no entanto, tais correções não anulam a presença de efeitos sistemáticos no conjunto dos dados (SILVA; FREITAS, 2019). Isto posto, pode-se justificar a diferença no comportamento dos dados, principalmente da maregrafia, destas últimas duas EM analisadas.

Comparando os valores do NMM encontrados nas técnicas de ALTSAT e maregrafia, apresentados na Tabela 2, pode-se constatar que, de forma geral, a técnica ALTSAT apresentou valores de NMM coerentes com resultados encontrados por outros autores e órgão nacional, como, Silva e Freitas (2019), Calado, Garnés e Jamur (2020) e IBGE (2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Neste capítulo foi proposta uma metodologia aprimorada, em substituição aos procedimentos tradicionais, para definição do NMM com a utilização de dados de Altimetria por Satélite (ALTSAT) validado por dados maregráficos das estações EMFOR (Fortaleza–CE), EMSAL (Salvador–BA), EMMAC (Macaé–RJ) EMIMB (Imbituba–SC), todas localizadas na costa brasileira e pertencentes à RMPG.

Considerando uma análise comparativa entre as técnicas ALTSAT e maregrafia, verificou-se discrepâncias de ordem centimétrica, sendo, 01 mm em EMFOR, 03 mm em EMSAL, 19 mm em EMMAC e 04 mm em EMIMB. Em relação à análise de tendência a maregrafia, muitas vezes, apresentou uma tendência decrescente. Já a técnica ALTSAT, na maioria dos casos, apresentou uma tendência crescente, o qual é consistente com a tendência da média global 3,51 mm/ano, com dados de 1993 até 2020 (AVISO, 2021).

Em suma, a média do NMM estimado por ALTSAT, nas quatro estações maregráficas, é compatível àquelas obtidas por monitoramento realizado pelo IBGE (2021) e resultados de outros autores, como, Silva e Freitas (2019), Calado, Garnés e Jamur (2020). Diante dos resultados, pode-se constatar que o estudo proposto, para utilização de dados ALTSAT, apresentou resultados coerentes com os dados maregráficos. Portanto, nos permite afirmar que a metodologia é viável e pode ser empregada como alternativa ao uso de estações maregráficas, amortizando os custos envolvidos.

Destarte, pode-se reconhecer algumas vantagens da técnica ALTSAT na metodologia proposta, como: os dados são distribuídos gratuitamente e por diversos centros; viabiliza a aquisição, em caráter global, do nível do mar e demais níveis; os dados são acrescidos de diversos tratamentos e correções; e, por fim, não é afetado por efeitos decorrentes da movimentação terrestre e mudança de referência local.

Contudo, é provável que derivas significativas nos sensores eletrônicos e movimentações crustais tenham interferido nas análises maregráficas, principalmente em EMMAC e EMIMB (IBGE, 2021). Recomenda-se para trabalhos futuros que seja realizado uma investigação para detectar e quantificar tanto os movimentos verticais de origem não oceânica quanto as derivas e inconsistências instrumentais dos marégrafos. Ademais, aplicar o mesmo estudo em dados de multimissões de satélites altimétricos e utilizar estações maregráficas de diferentes localidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, G. P. **Confiabilidade de Rede GPS de Referência Cadastral Municipal – Estudo de Caso: Rede do Município de Vitória (ES)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

AVISO - ARCHIVING, VALIDATION AND INTERPRETATION OF SATELLITE OCEANOGRAPHIC DATA. 2021. **Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data**. Disponível em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. Acesso em: dezembro 2021.

BORGES, A. **Maiores represas do País enfrentam seca histórica**. Estadão – Economia, publicado em 23 de setembro de 2017. Disponível em: <https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,maiores-represas-do-pais-enfrentam-seca-historica>. Acessado em: novembro de 2022.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. **Estimativas do Nível do Mar na América do Sul a partir de Registros Maregráficos e Coordenadas SIRGAS-CON**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 72, n. 1, p 142-158, 2020.

CRESSIE, N. **The Origins of Kriging**. Mathematical Geology, v. 22, n. 3, p. 239-252. 1990.

CODESAL - DEFESA CIVIL DE SALVADOR. **Operação Chuva 2020 – Relatório Final**. Disponível em: http://www.codesal.salvador.ba.gov.br/images/pdf/op_chuva/RELATRIO_OP_CHUVA_2020_compressed.pdf. Acessado em: dezembro de 2020.

COSTA, M. C. **Influência das tensões do vento na variação do Nível Médio do Mar da região costeira de Cananéia (SP): filtragem numérica e análise espectral**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Meio Ambiente), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

DINARDO, S.; FENOGLIO-MARC, L.; BUCHHAUPT, C.; BECKER, M.; SCHARROO, R.; JOANA FERNANDES, M.; BENVENISTE, J. **Coastal SAR and PLRM altimetry in German Bight and West Baltic Sea**. *Advances in Space Research*, v. 62, n. 6, p. 1371–1404, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.018>.

DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (2º revisão)**. Marinha do Brasil, 2017.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **Satellite Radar Altimetry: past and future**. 2018. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/news/satellite-radar-altimetry-past-and-future>. Acessado em: abril de 2020.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **CryoSat-2 Product Handbook**. 2023. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/CryoSat-Baseline-D-Product-Handbook.pdf/c76df710-2a5c-c8b8-00c1-13c8db0e9f51>. Acessado em: janeiro de 2023.

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2º edição. 344p. Niterói, 2009.

FERREIRA, Í. O. **Controle de Qualidade em Levantamentos Hidrográficos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.

GASPARY, W. F. **Concepts of network and deformation analysis – Third impression**. Monograph II - School of Surveying. University of New South Wales. Kensington, N. S. W. Australia, 2000.

GIEHL, S. **Determinação de movimentos verticais da crosta por meio da integração de observações maregráficas e da altimetria por satélite no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba no período de 2002 a 2015**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná - UFPR, Curitiba, 108 p, 2020.

GÓMEZ-ENRI, J.; VIGNUDELLI, S.; CIPOLLINI, P.; COCA, J.; GONZÁLEZ, C. J. **Validation of CryoSat-2 SIRAL sea level data in the eastern continental shelf of the Gulf of Cadiz (Spain)**. *Advances in Space Research*, v. 62, n. 6, p. 1405-1420, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.10.042>

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro, 65 p. 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia: 2001-2020**. Rio de Janeiro, 125 p, 2021.

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE**. *Geophysical Research Letters*, v. 44, n. 11, p. 5609–5617. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL073777>.

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **Coastal sea level from CryoSat-2 SARIn altimetry in Norway**. *Advances in Space Research*, v. 62, n. 6, p. 1344–1357, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.07.043>

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **El Niño e La Niña**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: maio de 2020.

KAYANO, M. T.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F.; GARCIA, S. R.; CALHEIROS, A. J. P. **El Niño e La Niña dos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos**. *Revista Climanalise - Edição Comemorativa de 30 anos*. 2016.

KLEINHERENBRINK, M.; NAEIJE, M.; SLOBBE, C.; EGIDO, A.; SMITH, W. **The performance of CryoSat-2 fully-focussed SAR for inland water-level estimation**. *Remote Sensing of Environment*, v. 237, n. 111589, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111589>

LIEBSCH, G.; NOVOTNY, K.; DIETRICH, R.; SHUM, C. K. **Comparison of Multimission Altimetric Sea-Surface Heights with Tide Gauge Observations in the Southern Baltic Sea**. *Marine Geodesy*, v. 25, n. 3, p. 213–234. 2010.

MATHERON, G. **Kriging or Polynomial Interpolation Procedures**. *CIMM Transactions*, v. 70, p. 240-244. 1967.

MCGOOGAN, J. T.; MILLER, L. S.; BROWN, G. S.; HAYNE, G. S. **The S-193 radar altimeter experiment**. *Proceedings of the IEEE*, v. 62, n. 6, p. 793-803. 1974.

MELO, D. C. R.; CASTRO, A. R. **Uma Nova Abordagem Para Detecção de Outliers em Séries Temporais: Estudo de Caso em Consumo de Energia na Região Amazônica**. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Applied and Computational Mathematics*, v. 1, n. 1, 2013.

MOHAMMADI, K.; GOUDARZI, N. **Study of Inter-Correlations of Solar Radiation, Wind Speed and Precipitation Under the Influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California**. *Renewable Energy*, v. 120, p. 190-200. 2018.

NERO, M. A. **Proposta para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfases na componente posicional**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PAJAK, K.; KOWALCZYK, K.A. **Comparison of Seasonal Variations of Sea Level in the Southern Baltic Sea from Altimetry and Tide Gauge Data**. *Advances in Space Research*, v. 63, n. 5, p. 1768-1780. 2019.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level**. Chichester, UK. John Wiley & Sons, Ltd. 486 p., 1987.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. **Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, n. 2, p. 345-364, 2020.

SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JUNIOR, J. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira.** Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 4, p. 630-650, 2016a.

SANTOS, A. P. P.; ARAGÃO, M. R. S.; CORREIA, M. F.; SANTOS, S. R. Q.; SILVA, F. D. S.; ARAÚJO, H. A. **Precipitação na Cidade de Salvador: Variabilidade Temporal e Classificação em Quantis.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 04, 2016b. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778631231420150048>

SIEGA, Y. V.; MENDES, C. F.; PETRY, D. – **Análise Multivariada Do Regime Pluviométrico Do Estado De Santa Catarina Nos Anos De 1999 A 2000.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (XVII SILUBESA), v. IV, n. 17, 2017. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento32/TrabalhosCompletoPDF/IV-017.pdf>. Acessado em janeiro de 2023.

SILVA, L. M.; FREITAS, S. R. C. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba.** Revista Cartográfica, n. 98, p. 33–57. 2019.

SOUZA, L. M.; FERREIRA, I. O. **Análise da Variabilidade Espaço-temporal da Topografia do Nível "Médio" do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia.** Revista Brasileira de Cartografia, v. 73, n. 3, p. 751-770, 2021.

VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. (ed.). **Coastal altimetry.** Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 578 pp, 2011. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0

ZARON, E. D. **Ocean and Ice Shelf Tides from CryoSat-2 Altimetry.** Journal of Physical Oceanography, v. 48, n. 4, p. 975-993, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0247.1>

CAPÍTULO 4. DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE REDUÇÃO A PARTIR DE DADOS DE ALTIMETRIA POR SATÉLITE

Resumo

As profundidades presentes na carta náutica, estão referenciadas a um Nível de Redução (NR), o qual é o ponto de referência utilizado para indicar a profundidade da água em relação ao fundo do mar, e sua precisão é fundamental para evitar acidentes e garantir a navegabilidade das embarcações. Existem diversos fatores que podem afetar o NR em uma região costeira, por isso, é essencial que este nível seja constantemente atualizado para refletir as condições atuais da região. Embora o NR tenha a importância em garantir a segurança para a navegação e projetos costeiros, este não tem uma periodicidade em sua atualização devido ao alto custo para instalação de maregrafos. Neste sentido, este capítulo propõe uma metodologia alternativa para a definição do NR a partir de dados de Altimetria por Satélite (ALTSAT), da missão CryoSat-2 (CS-2), em uma série temporal de fevereiro de 2011 a julho de 2020. Para a comparação e validação do método, fez-se uso dos dados das Estações Maregráficas (EM) de Fortaleza – CE (EMFOR) e Salvador – BA (EMSAL) pertencentes à Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia (RMPG). Aplicou-se a metodologia proposta nos dados do CS-2 e das observações das EM, e na sequência os NR obtidos foram analisados baseando-se nas discrepâncias e o erro relativo entre as técnicas. Os resultados indicaram diferenças de 1 mm para EMFOR e 3 mm para EMSAL, entre o NR de ambas as técnicas. Logo, a metodologia proposta para definição do NR utilizando dados do CS-2, mostrou-se eficiente e apresentou resultados compatíveis com as observações maregráficas.

1. INTRODUÇÃO

Nos levantamentos hidrográficos, as profundidades que são obtidas incluem a variação do nível das águas, a qual diferem de uma região para outra. Esta variação pode ser por influência das marés ou em decorrência dos períodos de cheias e vazantes de rios. Com o intuito de eliminar esse efeito, adota-se um plano de referência ao qual todas as profundidades obtidas são relacionadas a uma maré mínima local (KRUG; NOERNBERG, 2005). Segundo a IHO (2005), um plano de referência deve ser tão baixo que a maré, em condições normais, não fique abaixo dele. Este plano de referência é denominado Nível de Redução (NR).

Existem vários planos para a determinação do NR, à vista disso a *International Hydrographic Organization* (IHO) propôs uma padronização mundial ao adotar o nível *Lowest Astronomical Tide* (LAT) como padrão internacional. O LAT é definido como o nível de maré mais baixo previsto para ocorrer, sob condições meteorológicas médias e quaisquer combinações de condições astronômicas. Para seu cálculo considera as componentes harmônicas da maré astronômica (IHO, 2018).

A maré astronômica é associada a movimentos astronômicos periódicos e ao realizar a análise harmônica de maré em séries anuais, os resultados podem ser afetados pelo ciclo nodal da Lua (de período 18,61 anos). Ao utilizar séries de maior extensão, as correções devido à influência desse ciclo podem ser evitadas fazendo com que as análises harmônicas de maré gerem resultados mais precisos (COELHO, 2016).

Este é um dos motivos, que a IHO (2018) recomenda a utilização de no mínimo 19 anos de observações maregráficas contínuas para definição do LAT. Porém, esta não é a realidade dos dados maregráficos brasileiros, dificultando o cumprimento deste requisito. Apesar do LAT ser o nível padrão recomendado, muitos países utilizam outros níveis de redução. A DHN define como Nível de Redução das cartas náuticas das áreas marítimas brasileiras o plano correspondente à média das baixa-mares de sizígia (do inglês, *Mean Low Water Springs - MLWS*).

No Brasil, a definição do NR local é realizada a partir da classificação da maré, que tem por objetivo escolher o melhor método para o cálculo do NR e se baseia no critério de Courtier (COURTIER, 1938). A Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) estabelece uma metodologia para a realização do cálculo do NR local conforme as seguintes etapas: definição do período temporal de observações do nível do mar com duração mínima de 32 dias, sendo recomendável 1 ano; aquisição das constantes harmônicas a partir da análise harmônica (M_2 , S_2 , N_2 , K_2 , K_1 , O_1) referente ao período temporal observado e o Nível Médio (NM) obtido; classificação da maré; cálculo do somatório das amplitudes das principais componentes harmônicas segundo o critério de Courtier (1938) e Balay (1952) e; por fim, a obtenção da cota Z_0 , que é a cota que situa o NR sob o Nível Médio da Régua (NMR) maregráfica. Ressalta-se que tanto o NR quanto o NMR são cotados a partir do zero da régua maregráfica (origem das observações maregráficas) a fim de garantirem que todos permaneçam amarrados à rede de Referências de Nível (RRNN) (DHN, 2017).

Entretanto, inconsistências no estabelecimento do NR podem ocorrer por vários motivos: seja em função da qualidade e da duração da série temporal de nível do mar, da correção ou não de efeitos meteorológicos e oceanográficos, do método de cálculo adotado, da

alteração das constantes harmônicas do local e de variações ao longo do tempo do NML (SIMON, 2007). O problema se torna evidente quando há grande incidência de baixa-mares situadas abaixo do NR, o que gera profundidades negativas, afetando a segurança na navegação.

Segundo Arentz (2009), o NR está associado ao nível médio local obtido em um período curto de observações, principalmente em virtude da ausência de longas séries temporais. Desta forma é importante que as observações, no marégrafo, para a determinação do NR sejam revistas periodicamente, a fim de verificar variações nas amplitudes das componentes harmônicas do local. Conquanto, no Brasil, esta prática é praticamente inexecutável devido ao alto custo atrelado a instalação e manutenção de um marégrafo, em especial para pequenas empresas do ramo marítimo/costeiro.

Importante frisar, para que levantamentos batimétricos atinjam boa precisão é necessário levar em consideração a variação da maré astronômica e meteorológica, além do nível de redução. As observações do nível da maré para calcular o NR devem ser prolongadas, ao contrário resultará em dados imprecisos e informações de profundidades errôneas (KE et al., 2020).

Estas colocações despertam o interesse em buscar opções viáveis que permitam a constante atualização do NR, o qual possa ser atualizado periodicamente e com menor custo envolvido. Este foi o incentivo pela busca na literatura sobre metodologias alternativas para a resolução deste questionamento. Apesar da carência em estudos nesta área, principalmente nacionais, encontrou-se como alternativa a utilização de dados de Satélites Altimétricos (ALTSAT) para a obtenção do NR, como utilizaram Ke et al. (2020) e Azkue, D'Onofrio e Banegas (2021).

Ke et al. (2020) avaliaram o NR obtido a partir de dados de Altimetria por Satélite multimissão (solução 1), dados do modelo gravitacional EGM2008 associado ao modelo de maré *Atlantic Ocean* 2008 (solução 2) e comparados ao NR obtido por dados maregráficos, da baía da Grande Muralha na Península Antártica. Os autores verificaram que o nível de redução obtido pela solução 1 apresentou uma diferença de 42 cm, sendo o resultado mais aproximado aos dados maregráficos.

Azkue, D'Onofrio e Banegas (2021) utilizaram dados de satélites altimétricos, constantes harmônicas e modelos globais do nível do mar para desenvolver o primeiro modelo empírico de distâncias entre o NR e o elipsoide WGS84 para uma região que existe poucas observações do nível do mar no Sudoeste do Oceano Atlântico. A superfície obtida foi projetada para mar aberto, sendo útil tanto para o desenvolvimento de atividades marítimas, como para o

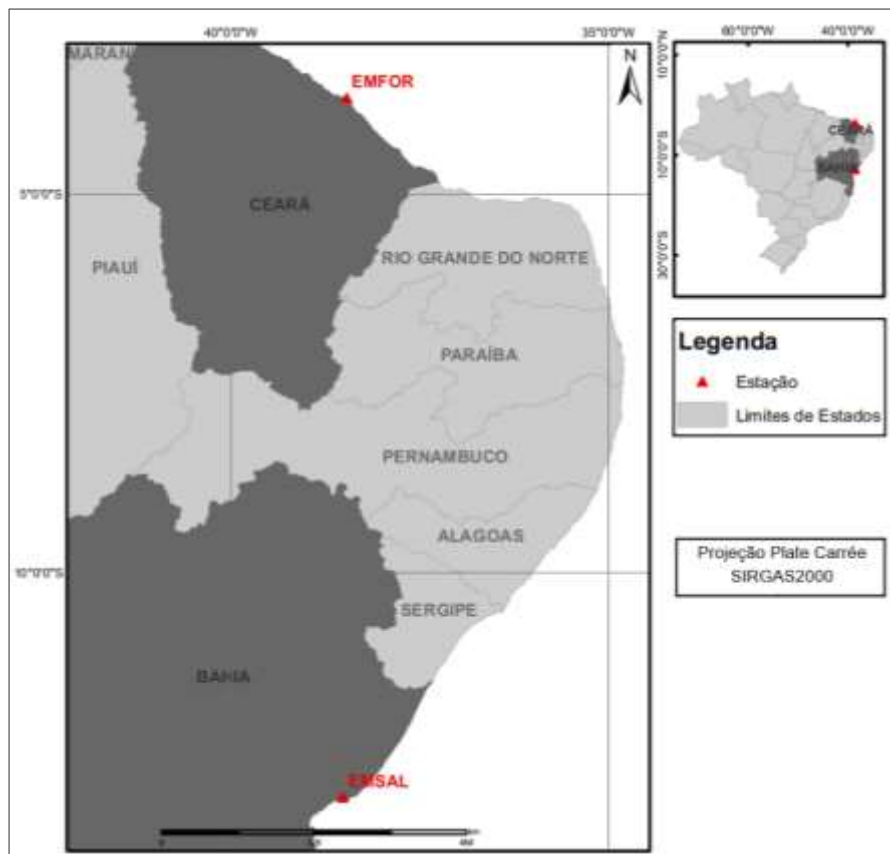
aumento da eficiência dos levantamentos hidrográficos, além de contribuir para uma navegação mais precisa em zonas críticas.

A partir dos estudos apresentados, verifica-se que em um cenário atual, a utilização de dados ALTSAT ainda não foram empregados para a definição do NR, principalmente na costa brasileira. Portanto, este capítulo tem como objetivo estabelecer uma metodologia para a obtenção do NR utilizando dados do satélite altimétrico CryoSat-2. A metodologia foi validada a partir de dados maregráficos e constantes conhecidas referentes a duas estações do Nordeste brasileiro, em uma série temporal de 2011 a 2020.

2. MATERIAS E MÉTODOS

Foram utilizados dados do satélite altimétrico CryoSat-2 (CS-2) e observações das Estações Maregráficas (EM) de EMFOR (Fortaleza - CE) e EMSAL (Salvador - BA), no período de fevereiro de 2011 a julho de 2020. A Figura 1 apresenta a localização das estações maregráficas.

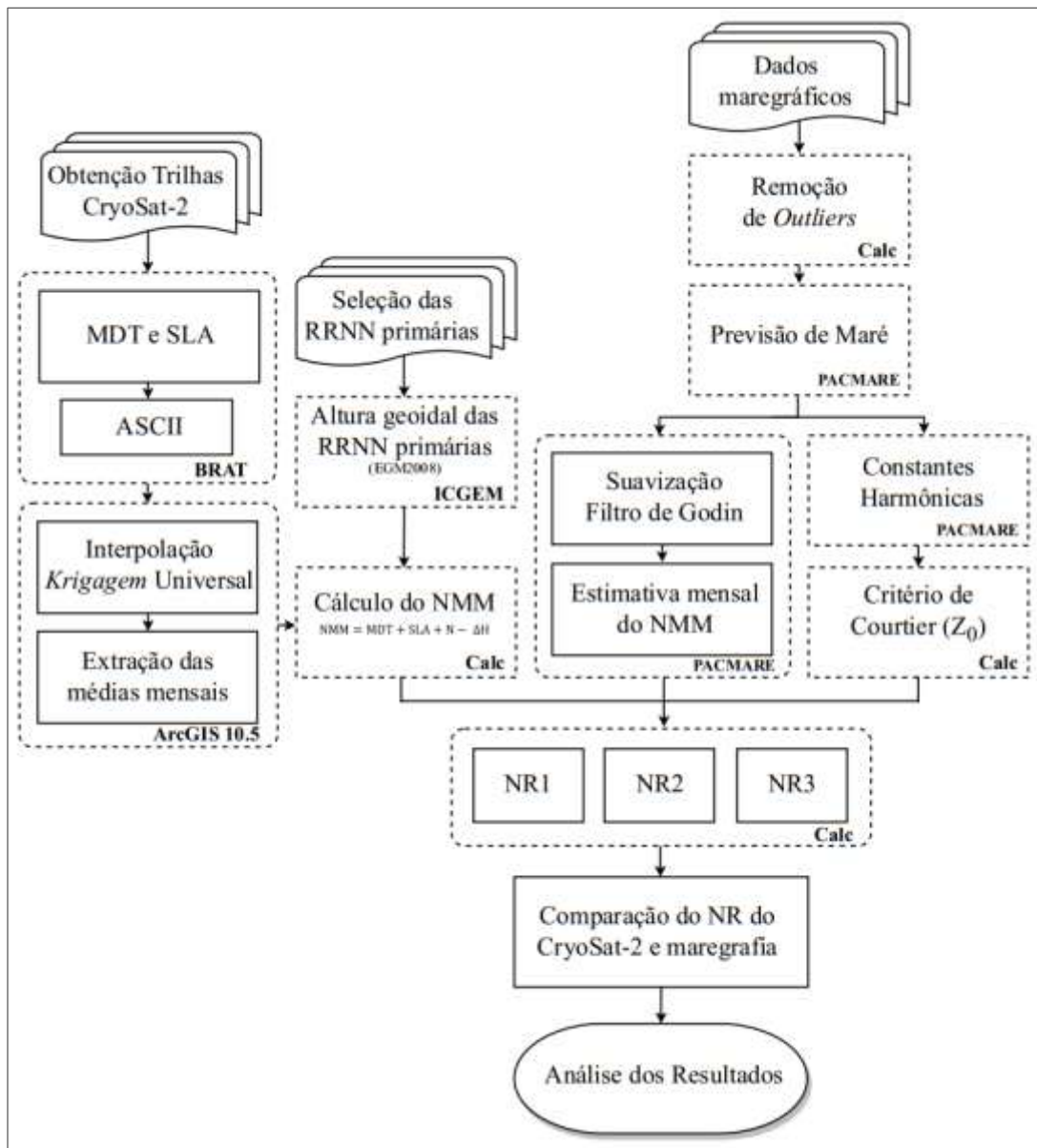
Figura 1 – Localização das estações maregráficas do CryoSat-2.



Fonte: Autora.

A Figura 2 mostra um fluxograma dos principais passos da metodologia utilizada.

Figura 2 – Fluxograma metodológico.



Fonte: Autora.

Os dados do CS-2 foram adquiridos através do sítio do *Copernicus Marine and Environment Monitoring* (CMEMS), sendo o *Sea Level Anomaly* (SLA) que é a anomalia do nível do mar em relação ao NMM e *Mean Dynamic Topography* (MDT) que é a Topografia do Nível Médio do Mar, também conhecido como TNMM.

Estes são criptografados em formato *.nc* (*Network Common Data Form - NetCDF*) e necessitam do auxílio de um *software* específico, o *freeware Broadview Radar Altimetry Toolbox* (BRAT) - versão 4.2.1, para a extração da Latitude, Longitude, MDT e SLA das

regiões de interesse. Os dados do CS-2 são referenciados ao modelo geopotencial global EGM2008.

A RMPG, mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponibiliza gratuitamente observações maregráficas de suas estações. No próprio sítio do IBGE, foram adquiridos os dados referentes as estações maregráficas de EMFOR e EMSAL

2.1 CryoSat-2

Ao utilizar observações de satélites altimétricos, é importante levar em consideração o espaçamento entre as trilhas e a quantidade de dados registrados (ZARON, 2018). O satélite CS-2 órbita a Terra com um período de revisita médio, cerca de 13 a 15 dias dependendo do local no globo. Logo, não coleta dados diários e por este motivo foi necessário utilizar um interpolador para preencher a área entre as trilhas. Para isto, utilizou-se o *software* ArcGIS, versão 10.5, (licença do Departamento de Engenharia Civil – DEC, da Universidade Federal de Viçosa - UFV) para aplicar a Krigagem, como interpolador geoestatístico, e em sequência extrair os dados mensais das regiões das EM.

As coordenadas das RRNN primárias e vizinhas, das EM, foram obtidas no Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE e as alturas geoidais das RRNN através do *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM⁷), referenciadas ao EGM2008.

A compatibilização das superfícies de referência é crucial para garantir a concordância entre as técnicas de ALTSAT e maregrafia. Enquanto a Altimetria por Satélite está associado a um elipsoide e um modelo geopotencial global como referência, a maregrafia mensura as variações do nível do mar em relação a um referencial local. Portanto, é essencial que as superfícies de referência de ambas as técnicas sejam padronizadas. No entanto, essa tarefa é complexa, pois os dados não estão no mesmo sistema de referência (LIEBSCH et al., 2010).

Pajak e Kowalczyk (2019) apresentam uma solução para integrar as diferentes superfícies utilizando a altura geoidal (N) e ΔH , que é a diferença entre altura da Referência de Nível (RN) primária (vizinha) até o nível médio local do marégrafo (valor extraído do BDG e F-41 da DHN). O NMM, referente aos dados do CS-2, pode ser obtido através da Equação 1:

$$\text{NMM} = \text{MDT} + \text{SLA} + \text{N} - \Delta H \quad (1)$$

⁷ <http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>

2.2 Maregrafia

Apesar dos dados de maregrafia passarem por um controle antes de serem disponibilizados pelo IBGE, estes ainda carecem de um pré-processamento como a eliminação de *outliers*, preenchimento de dados faltantes e a suavização das observações. Para a eliminação de *outliers*, fez-se uso do teste 3σ , o qual é baseado no desvio padrão (σ) e na média (μ) do conjunto de dados, conforme Equação 2 (NERO, 2005).

$$|\text{Observação}| < |\text{Média } (\mu)| + 3 * \sigma \quad (2)$$

Com o propósito de preencher a ausência de algumas observações, utilizou-se os módulos ANALEXEC e PREVISÃO do *software* PACMARÉ (FRANCO, 2009). Com o módulo ANALEXEC é possível realizar a análise harmônica e obter as constantes harmônicas da maré para que posteriormente são utilizados no módulo PREVISÃO. Este último módulo, utiliza os parâmetros significativos, estáveis no tempo, das componentes harmônicas para gerar estimativas das previsões de maré (FRANCO, 2009). A partir das previsões de maré, foi possível preencher as observações faltantes para as estações maregráficas (EM) em estudo. Mais detalhes sobre previsão de maré e análises harmônicas podem ser encontrados em Pugh (1987) e Franco (2009).

Em sequência, utilizou-se o módulo NIMED, também do PACMARÉ. Este pacote aplica um filtro suavizador passa-baixa para estimar o NMM, tendo como opção os filtros de Thompson e Godin. De forma a padronizar as análises, elegeu-se por utilizar o filtro de Godin em ambas estações, pois este corrige a tendenciosidade dos dados e se baseia na aplicação de três médias móveis. Desta forma, obteve-se o NMM mensal para cada EM.

2.3 Nível de Redução

Para o cálculo do NR no Brasil, emprega-se a metodologia segundo o critério de Courtier (1938) (RAMOS, 2007). Victor Courtier foi um hidrógrafo francês do século XIX e seu critério tem sido amplamente utilizado para a determinação do nível de redução de cartas náuticas. Em suma, utiliza-se amplitudes e fases das componentes harmônicas específicas para determinar o Z_0 (semi-amplitude máxima da onda de maré) e obter a cota do NR em relação ao Nível Médio da Régua (NMR).

De posse das constantes harmônicas obtidas através das observações maregráficas aplicadas ao módulo ANALEXEC do *software* PACMARÉ (FRANCO, 2009), foi possível

realizar o cálculo do fator C, conforme Equação 3. Em sequência verificou-se em qual intervalo o fator C se enquadra (Tabela 1) para então classificar o padrão de maré local (DHN, 2017):

$$C = \frac{H(O_1) + H(K_1)}{H(M_2) + H(S_2)} \quad (3)$$

em que:

H: amplitude da componente harmônica;

O₁: maré principal diurna lunar;

K₁: maré diurna de declinação;

M₂: maré principal semidiurna lunar;

S₂: maré principal semidurna solar.

Tabela 1 – Critério de Courtier para classificação de maré.

Intervalo	Classificação da maré	Cota do NR sob o NMR (Z ₀)
$0 \leq C \leq 0,25$	Semidiurna	$H(M_2) + H(S_2) + H(N_2) + H(K_2)$
$0,25 < C \leq 1,5$	Semidiurna com desigualdades	BALAY (1952)
$1,5 < C \leq 3$	Mista	$H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1)$
$C > 3$	Diurna	$H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1) + H(P_1)$

Fonte: NORMAM 25 (DHN, 2017).

em que:

N₂: maré semidiurna lunar elíptica maior;

K₂: maré semidiurna de declinação;

P₁: maré principal diurna solar.

Para a maré classificada como semidiurna com desigualdades, utiliza-se o Critério de Balay (1952). Este critério, necessita-se definir, primeiramente, o fator 2k, o qual busca relacionar as fases da principal componente lunar semidiurna M₂ à combinação das fases das componentes diurnas O₁ e K₁. Conforme a DHN (2017), o fator 2k pode ser obtido a partir da Equação 4:

$$2k = G(M_2) - [G(O_1) + G(K_1)] \quad (4)$$

em que, G: é a fase da componente harmônica.

De acordo com o valor encontrado para 2k utiliza-se as fórmulas listadas na Tabela 2 para obter o valor de Z₀.

Tabela 2 – Cota do NR referenciado ao NMM para marés semidiurnas com desigualdades.

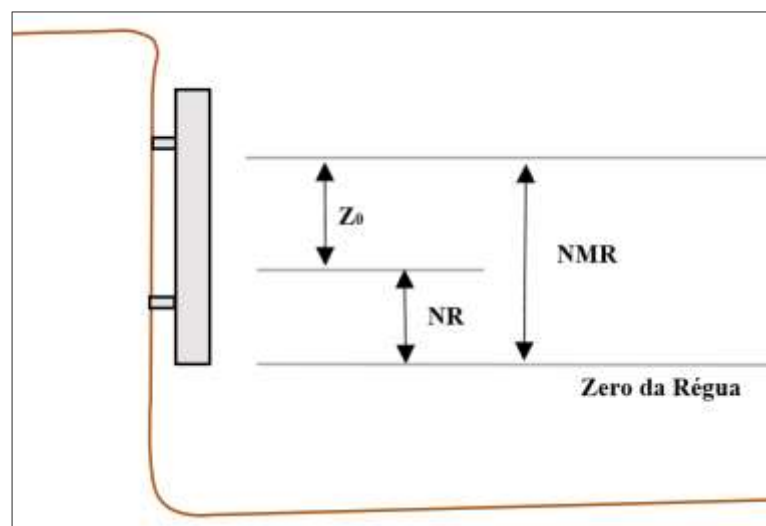
Valor de $2K$	Cota do NR sob o NMR (Z_0)
$2k = 0^\circ$ (Maré semidiurna com BM iguais)	$H(M_2) + H(S_2) + H(N_2)$
$2k = 180^\circ$ (Maré semidiurna com PM iguais)	$H(M_2) + H(S_2) + H(N_2) + H(K_1) + H(O_1)$
$2k \neq 0^\circ$ e $\neq 180^\circ$ (Maré semidiurna com variações de amplitude)	$H(M_2) + H(S_2) + H(K_1) + H(O_1) + H(P_1)$

Fonte: NORMAM 25 (DHN, 2017).

A partir do Z_0 (semi-amplitude máxima da onda de maré), o qual corresponde à distância vertical entre o NMR até o NR do local analisado (Figura 3), é obtido através da Equação 5:

$$NR = NMR - Z_0 \quad (5)$$

Figura 3 – Diagrama dos níveis de uma estação maregráfica.



Fonte: Autora.

A metodologia clássica para obtenção do NR é baseada na utilização de observações maregráficas, relacionando o Nível Médio da Régua (NMR) e o Z_0 (a diferença entre o NR e o NMR). O Z_0 é calculado a partir de constantes harmônicas aplicadas às equações do Critério de Courtier.

No entanto, os dados provenientes da ALTSAT têm uma periodicidade geralmente de 15 dias, e estes não são suficientes para obter as constantes harmônicas, que necessitam de pelo menos observações horárias da maré. Logo, têm-se um obstáculo para obter o NR a partir da ALTSAT utilizando esta metodologia. A fim de contornar esta limitação, foram propostas formas para a definição do NR.

Como o NR é contabilizado a partir do zero do marégrafo e o NMM, obtidos pelas observações do IBGE e CS-2, não estão referenciados ao marégrafo, logo, se faz necessário

transportar o NMM para o NMR e posteriormente definir o NR. Para isso, uma solução seria aplicar constantes para o transporte de referência do NMM obtido pela maregrafia e CS-2.

O IBGE disponibiliza uma ficha de correlação de níveis de cada EM, pois os dados disponibilizados apresentam valores relativos, ou seja, utilizam um referencial próprio do IBGE e apenas as variações do nível são consideradas como informações absolutas (IBGE, 2021). Logo, as constantes disponíveis nesta ficha, são para vincular as observações maregráficas com referências conhecidas, como, o Datum Vertical Brasileiro (DVB), o NR informado pela DHN, o elipsoide de referência do GNSS (WGS84) e outros.

De posse das constantes obtidas nas fichas de correlação e os valores do NMM de cada EM, foram exploradas diferentes proposições de equações com a finalidade de obtenção do NR. Em seguida, fez-se a comparação entre as técnicas do CS-2 e maregrafia, posteriormente foram avaliados os resultados encontrados.

$$NR1 = NMM - H \quad (6)$$

$$NR2 = (NMM - A) - Z_0 \quad (7)$$

$$NR3_{CS-2} = \left(\sum \frac{MDT+SLA+N-\Delta H-A}{n} \right) - Z_0 \quad (8)$$

$$NR3_{RMPG} = \left(\sum \frac{Obs-A}{n} \right) - Z_0 \quad (9)$$

Onde: MDT e SLA são dados do CS-2; N é a altura geoidal da RN primária; A é o desnível entre o marégrafo radar e a régua maregráfica; H é a constante a ser subtraída das leituras do marégrafo para referenciá-las ao NR; Obs são as leituras do marégrafo e; n o número de observações.

A utilização da constante H, na equação 6, é uma forma direta de estimar o NR a partir do NMM de cada estação. Já a utilização da constante A é para transportar o NMM para o NMR. Desta forma, realizou-se o teste com esta última constante em duas equações diferentes. Na equação 7, o objetivo primeiramente é transportar o NMM para o NMR e em seguida aplicar o Z_0 para definir o NR. Para as Equações 8 e 9, o propósito é transportar todos os dados mensais para o NMR e seguidamente aplicar o Z_0 . Logo, as equações 6 a 9 foram propostas com o intuito de avaliar se há diferenças nos NR obtidos a partir das diferentes combinações utilizando os dados de ambas as técnicas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de averiguar a eficiência do método proposto, foi realizada a avaliação dos NR obtidos pelos dados do CS-2 comparando-os com os NR determinado pelas observações maregráficas de EMFOR (Fortaleza–CE) e EMSAL (Salvador–BA), pertencentes à RMPG. Para a definição do NR, calculou-se o valor de Z_0 , a partir do critério de Courtier, obteve-se o NMM de ambas as técnicas e fez-se uso de constantes disponibilizadas pelo IBGE (2021).

Os resultados baseiam-se nas análises das discrepâncias e o erro relativo, obtidos entre os valores de referência e os estimados. Para a apresentação dos resultados, foram gerados gráficos e tabelas considerando cada valor calculado e avaliado, de acordo com a proposta deste capítulo.

As constantes harmônicas foram obtidas com 5 anos de observações maregráficas de cada estação e posteriormente calculou-se o fator C, conforme o Critério de Courtier (193). Ambas as EM utilizadas, foram caracterizadas como maré semidurna, pois os fatores C se apresentaram dentro do intervalo de $0 \leq C \leq 0,25$. Logo, não foi necessário fazer uso das equações segundo Balay (1952) para o cálculo de Z_0 . As amplitudes das componentes harmônicas e os fatores C calculados são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Amplitudes e Fator C das estações maregráficas.

ESTAÇÃO	AMPLITUDES (H)							FATOR C
	O1	K1	K2	M2	S2	N2	P1	
EMFOR	6,12	6,90	7,22	95,54	30,46	20,21	2,11	0,10
EMSAL	5,56	3,62	7,40	80,21	30,72	14,74	1,37	0,08

Fonte: Autora.

A ficha de descrição de estações maregráficas (F-41) é um documento gerado pelo Centro de Hidrografia da Marinha (CHM) onde contém informações como: a localização da estação e de todas as RRNN próximas; o período de observação utilizado para o cálculo do Nível Médio Local e do NR; as cotas entre as RRNN e a régua utilizada no período da observação; o comprimento da régua para o período de observação; dentre outras informações julgadas pertinentes (CHM, 2023). A Tabela 4 expõe o valor de Z_0 , calculado a partir das amplitudes das componentes harmônicas, além dos valores informados pelas fichas F-41 (CHM, 2023).

Tabela 4 – Valores do Z_0 calculado e retirados da F-41.

ESTAÇÃO	Z_0	
	CALCULADO (m)	F-41 (m)
EMFOR	1,534	1,546
EMSAL	1,331	1,292

Fonte: Autora e CHM (2023).

Apesar das F-41 serem de extrema importância em apoio às atividades de LH, estas nem sempre estão atualizadas. Por exemplo, a F-41 referente a estação EMFOR (Porto de Mucuripe – 30340) foi compilada com 731 dias (de 2008 a 2010) de observação da maré e atualizada em 2018. Já a estação EMSAL (Capitania dos Portos de Salvador – 40141) foi compilada com 138 dias (1998) de observação da maré e foi atualizada em 2011, sendo que esta ficha não está associada a régua do IBGE, logo, carecendo de atualização (CHM, 2023).

Analisando a Tabela 4, observa-se que o Z_0 calculado para EMFOR está próximo ao valor da F-41, em contrapartida, o Z_0 calculado para EMSAL apresenta uma maior diferença. Esta diferença, de aproximadamente 40 mm, evidencia a necessidade de atualização das informações contidas na F-41, pois a régua relacionada na F-41 não corresponde a instalada atualmente. Apesar das diferenças observadas, os valores calculados para Z_0 podem ser consideradas válidos pois, em relação aos valores da F-41 a comparação se torna relativa e não absoluta, devido a necessidade de atualização das informações contidas nas F-41.

A Tabela 5 sumariza, os valores do NMM obtido pelos dados do CS-2, RMPG e o informado pelo relatório do IBGE. Além das constantes A e H extraídas das fichas de correlação do IBGE.

Tabela 5 – Valores do NMM e constantes A e H.

ESTAÇÃO	NMM			IBGE	
	IBGE (m)	CS-2 (m)	RMPG (m)	A (m)	H (m)
EMFOR	6,343	6,349	6,348	3,257	4,754
EMSAL	7,289	7,283	7,286	5,043	6,371

Fonte: Autora e IBGE (2021).

Ainda de acordo com a Tabela 5, o NMM obtido pelo CS-2 e maregrafia variaram milimetricamente em relação a referência, ou seja, os valores do NMM estão próximos ao que é fornecido pelo relatório do IBGE (2021). Os valores de A e H foram utilizados nas equações para a determinação do NR em ambas as técnicas. Vale ressaltar que os valores de H são fornecidos pelo IBGE e este também utilizou informações contidas das Fichas F-41 do CHM.

Com o intuito de melhor quantificar as discrepâncias entre as técnicas, utilizou-se o erro relativo. Este é definido pelo quociente do erro absoluto (diferença entre os NR de ambas as técnicas) e o valor de referência (que será o valor do NR encontrado para RMPG), sendo expresso em porcentagem (%).

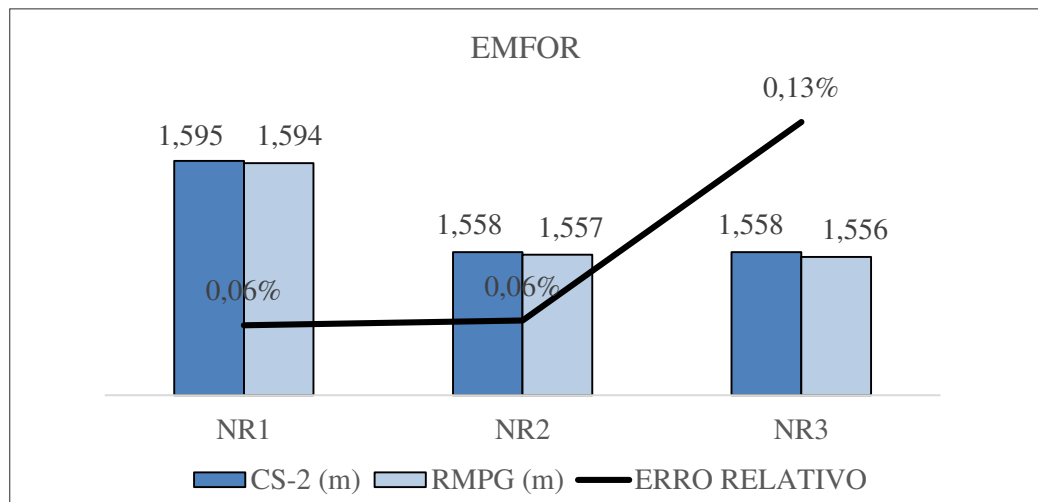
As Figuras e Tabelas a seguir, foram compiladas em escalas diferentes, de modo a melhorar a visualização e tornar as análises mais claras e consistentes. A Tabela 6 e a Figura 4 apresentam os valores dos NR obtidos a partir das equações propostas (Equações 6, 7, 8 e 9) e o erro relativo entre CS-2 e a EM de EMFOR.

Tabela 6 – Valores do NR e o erro relativo para EMFOR.

EQUAÇÃO	CS-2 (m)	RMPG (m)	ERRO RELATIVO
NR1	1,595	1,594	0,06%
NR2	1,558	1,557	0,06%
NR3	1,558	1,556	0,13%

Fonte: Autora.

Figura 4 – Valores do NR e o erro relativo para EMFOR.



Fonte: Autora.

Como pode ser visto através da Tabela 6 e a Figura 4, os valores obtidos para o NR1 destoaram cerca de 40 mm dos demais. Considera-se que esta diferença seja em razão da constante H, obtida do relatório do IBGE. Esta constante é derivada de várias informações inclusive dados da F-41, sendo que esta última é referente a dados desatualizados.

As discrepâncias verificadas entre CS-2 e maregrafia foram 1 mm para NR1 e NR2, e 2 mm para NR3. Para todas as equações, os erros relativos foram menores que 0,15%, o que mostra que os NR, obtidos pelo CS-2, possuem uma boa confiabilidade, isto é, ambas as equações representam com fidelidade o NR determinado pelos dados maregráficos.

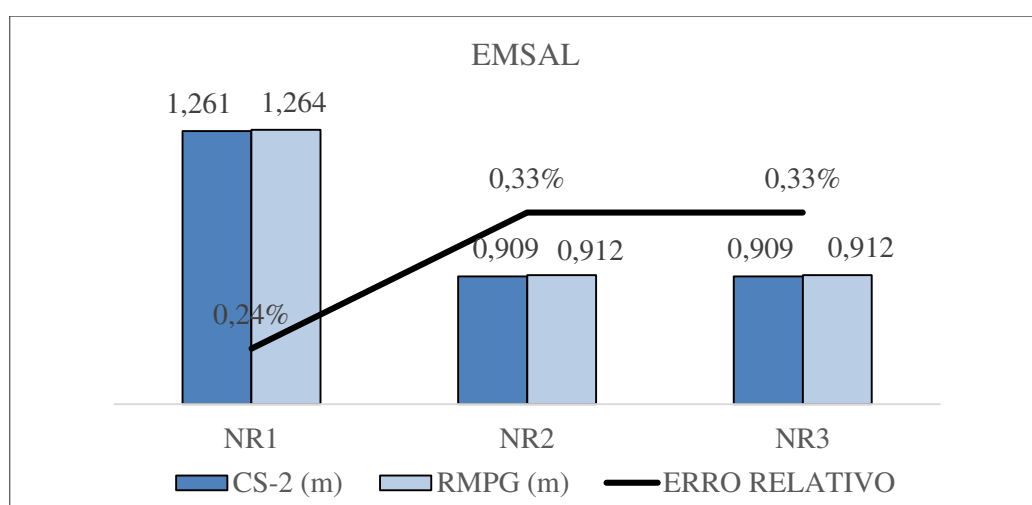
A Tabela 7 e a Figura 5 explicitam os valores dos NR obtidos a partir de cada equação proposta e o erro relativo entre CS-2 e a EM de EMSAL.

Tabela 7 – Valores do NR e o erro relativo para EMSAL.

EQUAÇÃO	CS-2 (m)	RMPG (m)	ERRO RELATIVO
NR1	1,261	1,264	0,24%
NR2	0,909	0,912	0,33%
NR3	0,909	0,912	0,33%

Fonte: Autora.

Figura 5 – Valores do NR e o erro relativo para EMSAL.



Fonte: Autora.

Ao analisar a Tabela 7 e a Figura 5, os valores obtidos para o NR1 divergiu aproximadamente 353 mm dos demais. Esta diferença pode ser caracterizada devido a equação do NR1 utilizar a constante H, que como já foi mencionado, contém informações da F-41, que esta se encontra obsoleta e se refere a uma régua maregráfica diferente da utilizada pelo IBGE. Assim, não se pode afirmar que o valor encontrado para NR1 representa um nível confiável. Vale destacar, que as demais equações fazem uso de constantes diferentes a utilizada para o NR1, e por este motivo resultaram em valores de nível bem diferentes.

As discrepâncias entre CS-2 e maregrafia se apresentaram em 3 mm para todas as equações. Adicionalmente, ao comparar os valores obtidos nas equações NR2 e NR3, constatou-se 100% de equivalência entre elas.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Este capítulo teve como principal objetivo propor uma metodologia alternativa a utilização de marégrafos, visando facilitar a constante atualização e verificação na definição do NR, além de reduzir os custos envolvidos. Trazendo uma contribuição para diversas áreas de estudos e ciências dependentes da informação do NR, como, a navegação e levantamentos hidrográficos.

Diante dos experimentos realizados, notou-se um padrão nas discrepâncias entre as técnicas, em relação as duas EM consideradas, sendo as maiores encontradas em EMSAL. Destacando, que o valor máximo de discrepância de 3 mm.

É notório a baixa variabilidade dos resultados expressos pelo CS-2 e RMPG, em ambas EM, e para todas as equações avaliadas, exceto para NR1 de EMSAL. Na qual foi a única equação que apresentou maior variação. Este resultado era esperado, já que a equação NR1 tem embutida informações da ficha F-41, que como vimos está desatualizada e não corresponde a régua instalada atualmente.

O efeito da defasagem da ficha F-41 permite reafirmar a importância da revisão periódica das informações sobre as estações maregráficas. Visto que, estas são a base para Levantamentos Hidrográficos e cartas náuticas. É proveitoso enfatizar, o quão importante são estas referências e o quanto são custosas a atualização das mesmas, principalmente em uma grande área costeira, como é o caso do Brasil.

Ressalta-se, que este estudo é pioneiro na utilização dados de ALTSAT na definição do NR para o Nordeste brasileiro. Face ao exposto, a metodologia proposta para dados do CS-2, mostrou-se eficiente e apresentou resultados compatíveis com as observações maregráficas. Ademais, este trabalho aponta a importância da revisão nas referências hidrográficas, que são de alta variabilidade ao longo do tempo. Portanto, espera-se que o método, aqui apresentado, seja útil para auxiliar a verificação e determinação do NR com um custo reduzido.

Por fim, recomenda-se a ampliação, da metodologia criada, para toda a extensão da costa brasileira. Podendo-se avaliar dados de multimissões de ALTSAT, modelos de maré locais ou globais, como o FES2014, além de contrasta-los com dados recentes de levantamentos hidrográficos nas áreas a serem analisadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENTZ, M. F. R. **A modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no canal norte do estuário do Amazonas**. 182 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

AZKUE, M. F. D.; D'ONOFRIO, E. E.; BANEGAS, L. **Development of an empirical chart datum model for a region of the Southwest Atlantic Ocean**. Ocean and Coastal Research, v. 69, 2021.

BALAY, M. A. **La cote du plan**. Revue Hydrographique Internationale, v. 24, n. 2. 1952.

CHM - CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Estações Maregráficas**. Marinha do Brasil, 2023. Disponível em: < <https://www.marinha.mil.br/chm/estacoes-maregraficas> >

COELHO, A. L. **Método de Previsão de Maré Oceânica, Utilizando Análise Harmônica em Séries de 18,69 anos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2016.

COURTIER, A. **Marées**. Service Hydrographique de la Marine. 234p. 1938.

DHN - DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO. **NORMAM 25: Normas da Autoridade Marítima para Levantamentos Hidrográficos (2º revisão)**. Marinha do Brasil, 2017.

FRANCO, A. S. **Marés: Fundamentos, Análise e Previsão**. Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2º edição. 344p. Niterói, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia: 2001-2020**. Rio de Janeiro, 125 p, 2021.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **C-13: Manual on Hydrography – 1 ed.** International Hydrographic Bureau. Monaco, 2005.

IHO - INTERNATIONAL HYDROGRAPHIC ORGANIZATION. **S-4: Regulations of the IHO for International (Int) Charts and Chart Specifications of the IHO**. Special Publication 4.8 ed. International Hydrographic Bureau, Monaco. 2018.

KE, H.; LI, F.; AI, S.; LEI, J.; WANG, Z.; ZHANG, S. **Establishment of chart datum and vertical datum transformation for hydrography in the Chinese Great Wall Bay, Antarctic Peninsula**. Journal of Surveying Engineering, v. 146, n. 2, p. 05020003, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000312](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000312)

KRUG, L. A.; NOERNBERG, M. A. **Extração de batimetria por sensoriamento remoto de áreas rasas dos sistemas estuarinos do Estado do Paraná - Brasil**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, p. 3077-3084. 2005.

LIEBSCH, G.; NOVOTNY, K.; DIETRICH, R.; SHUM, C. K. **Comparison of Multimission Altimetric Sea-Surface Heights with Tide Gauge Observations in the Southern Baltic Sea.** *Marine Geodesy*, v. 25, n. 3, p. 213–234. 2010.

NERO, M. A. **Proposta para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfases na componente posicional.** Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PAJAK, K.; KOWALCZYK, K.A. **Comparison of Seasonal Variations of Sea Level in the Southern Baltic Sea from Altimetry and Tide Gauge Data.** *Advances in Space Research*, v. 63, n. 5, p. 1768-1780. 2019.

PUGH, D. T. **Tides, Surges and Mean Sea-Level.** Chichester, UK. John Wiley & Sons, Ltd. 486 p., 1987.

RAMOS, A. M. **Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso.** 221p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2007.

SIMON, B. **La marée océanique côtière.** Institut Océanographique - Vol. 1. Paris, França, 433 p. 2007. ISBN 2903581320.

ZARON, E. D. **Ocean and Ice Shelf Tides from CryoSat-2 Altimetry.** *Journal of Physical Oceanography*, v. 48, n. 4, p. 975-993, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1175/JPO-D-17-0247.1>

CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa, observa-se que a aplicação dos métodos propostos poderá contribuir eminentemente com o processo de obtenção de informações e Níveis de Referência Hidrográficos, bem, como uma alternativa a metodologia clássica, além do baixo custo envolvido.

O capítulo 1 apresenta uma revisão bibliográfica dos principais conceitos relacionados aos Níveis de Referência Hidrográficos e da dinâmica das marés em áreas costeiras e oceânicas. Somando-se a isto, apresentou-se uma breve descrição da importância de informações da maré local, em especial, a segurança da navegação, bem como as normativas, órgãos nacionais e internacionais relacionados à hidrografia, como a Marinha do Brasil e a IHO. A principal motivação desta revisão se deu para suprir o déficit observado em literaturas brasileiras sobre o tema, além de incentivar o desenvolvimento de pesquisas neste contexto.

No capítulo 2, propôs-se o desenvolvimento metodológico no qual utiliza dados de ALTSAT, da missão CryoSat-2, para a obtenção do NMM, utilizando como referência observações maregráficas da estação EMFOR, em Fortaleza-CE. Escolheu-se os dados da missão CryoSat-2, devido esta ser uma missão que apresenta uma potencialidade no mapeamento do nível do mar próximo à costa, região deste estudo e pela disponibilidade de dados atuais (2011 a 2022) (IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2017; ESA, 2020).

Por meio dos resultados, o valor do NMM da Missão CryoSat- 2 apresentou ser coerente com o da maregrafia. E estes condizem com o NMM de 6,342 m, indicado no relatório da RMPG (IBGE, 2016), sendo a média obtida por ALTSAT de 6,342 m e 6,345 m para os dados maregráficos. Logo, vê-se que o NMM obtido por ALTSAT foi mais coerente com o relatório do IBGE do que a maregrafia. Em conformidade com estudos realizados por Calado, Garnés e Jamur (2018), ambas as técnicas concordaram indicando uma elevação média do nível do mar no período analisado. Vale destacar, que algumas divergências identificadas na variação do NMM devem-se ao fato da não aplicação, proposital, de filtros e correções nos dados provenientes de maregrafia. Em que, foram realizados apenas procedimentos de exclusão visual de valores espúrios, visando comparar as técnicas ALTSAT e os dados brutos de maregrafia na estimativa do NMM.

No capítulo 3, fez-se a ampliação e o aprimoramento do método inicial desenvolvido no capítulo 2. Para tal, adicionou-se a anomalia do nível do mar (SLA) nos dados altimétricos, suavização e aplicação de correções nos dados de maregrafia. Além disso, foi avaliada a aplicabilidade da metodologia proposta em diferentes locais ao longo da costa brasileira, por

meio de quatro estações maregráficas (EM), EMFOR (Fortaleza – CE), EMSAL (Salvador – BA), EMMAC (Macaé – RJ) e EMIMB (Imbituba – SC), em uma série temporal de 2011 a 2020.

Numa análise comparativa entre ALTSAT e maregrafia, foram encontradas discrepâncias de 01 mm em EMFOR, 03 mm em EMSAL, 19 mm em EMMAC e 04 mm em EMIMB, ou seja, diferenças de ordem centimétrica. Considerando a análise de tendência, em geral a maregrafia apresentou uma tendência decrescente. Já os dados de ALTSAT, em sua maioria, apresentou uma tendência crescente. Comparando com a tendência da média do nível do mar global de +3,51 mm/ano, referente a dados de 1993 até 2020 (AVISO, 2021), os dados do ALTSAT se apresentam mais coerentes com esta tendência.

Com a motivação em promover a atualização e frequente verificação do NR com uma redução nos custos envolvidos, o último capítulo descreveu um método para obtenção do NR utilizando dados de ALTSAT, em alternativa a técnica geralmente utilizada na hidrografia, a maregrafia. A metodologia foi autenticada a partir de dados maregráficos, análise harmônica e constantes conhecidas referentes a duas estações maregráficas do Nordeste brasileiro, EMFOR e EMSAL, contemplando 9 anos de dados.

O método foi aplicado nos dados das EM e ALTSAT. Por meio das discrepâncias e erro relativo, os NR obtidos foram avaliados. Observou-se diferenças de 1 mm com 0,06% e 2 mm com 0,13% de erro para EMFOR, EMSAL resultou em 3 mm com 0,33% de erro relativo, entre o NR de ambas as técnicas. Portanto, constatou-se uma alta correlação entre o NR obtido por ALTSAT e maregrafia, assim afirmando a confiabilidade nos dados de satélites altimétricos.

É oportuno enfatizar que no cenário atual, ainda não foram utilizados dados ALTSAT na obtenção do NR para a costa brasileira. Neste sentido, esta pesquisa se torna pioneira nesta aplicação em âmbito nacional. Contribuindo com diversas áreas de estudos e ciências dependentes da informação do NR, como, a navegação e levantamentos hidrográficos.

Embasado no exposto, este trabalho resultou no desenvolvimento metodológico para a obtenção do NMM e NR a partir da técnica ALTSAT, para a costa brasileira, utilizando dados da missão CryoSat-2. Contemplou uma análise bibliográfica acerca dos Níveis de Referência Hidrográficos, dinâmica das marés e normas relacionadas. Além de destacar a importância da revisão nas referências hidrográficas, que são de alta variabilidade e grande importância para a cartografia náutica e áreas costeiras.

Os resultados demonstraram que as metodologias propostas para a definição de Níveis de Referência Hidrográficos, são viáveis. Nos três últimos capítulos constatou-se que tanto o NMM quanto o NR, provenientes da técnica ALTSAT, apresentaram valores compatíveis com

dados de maregrafia. Portanto, conclui-se que os dados da missão CryoSat-2 podem ser empregados como alternativa, de baixo custo, ao uso de estações maregráficas para a obtenção do NMM e NR, permitindo também estimativas para locais em que dados maregráficos são inexistentes ou de baixa acurácia.

Por se tratarem de proposições metodológicas novas, a realização desta pesquisa apresentou resultados interessantes. Além de mostrar a importância da sua temática, evidenciou que apesar do Brasil ter uma grande área litorânea, estudos sobre a hidrografia ainda é pouco explorada. Logo, para trabalhos posteriores, sugerem-se melhorias e ampliações nas metodologias desenvolvidas, por exemplo; utilização de dados altimétricos multimissões; utilização de modelos de maré oceânica global, como, o DTU10 e FES2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVISO - ARCHIVING, VALIDATION AND INTERPRETATION OF SATELLITE OCEANOGRAPHIC DATA. 2021. **Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data**. Disponível em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. Acesso em: dezembro 2021.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. 2018. **Análise da Estação Maregráfica de Fortaleza para Determinar as Variações do Nível do Mar**. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - UFPE Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 461-470. 2018.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **Satellite Radar Altimetry: past and future**. 2018. Disponível em: <https://earth.esa.int/eogateway/news/satellite-radar-altimetry-past-and-future>. Acessado em: dezembro de 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro. 2016.

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. **The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE**. Geophysical Research Letters, v. 44, p. 5609–5617, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2017GL073777>.