



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

Analysis of Variability Temporal-space in the Mean Dynamic Topography (MDT) Using Satellite Altimetry Data and Stations of Permanent Monitoring Network for Geodesy

Larissa Messias de Souza ¹ e Italo Oliveira Ferreira ²

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geomática, Curitiba, Brasil. larissamessias@ufpr.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7767-1131>

² Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, Viçosa, Brasil. italo.ferreira@ufv.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4243-8225>

Recebido: 03.2021 | Aceito: 05.2021

Resumo: A técnica comumente aplicada para mensurar as variações locais do Nível "Médio" do Mar (NMM) e consequentemente da Topografia do Nível "Médio" do Mar (TNMM), têm sido a partir de uma abordagem geodésica, em que maregrafos são instalados na costa oceânica. No entanto, devido as dificuldades na manutenção de longas séries temporais, seja pela falta de recursos financeiros para instalação ou dificuldades técnicas para a instalação de maregrafos ou réguas linimétricas, vê-se como alternativa o emprego de dados por satélites altimétricos (ALTSAT). Diante disso, o presente estudo tem como objetivo propor uma metodologia para analisar as variações mensais da TNMM a partir de dados (ALTSAT) e de maregrafia, para este propósito, foi utilizada a missão CryoSat-2 (CS2) e os dados de maregrafia das estações EMFOR, EMSAL e EMIMB, todas pertencentes à Rede de Monitoramento Permanente para Geodésia (RMPG) no período de fevereiro de 2011 a setembro de 2019. Os resultados demonstraram que a metodologia proposta é viável e pode ser empregada como complemento em dados maregráficos. Numa análise comparativa das variações locais da TNMM, verifica-se, no geral, que houve uma variação mais acentuada nos dados de maregrafia ao serem comparados com a ALTSAT, tal comportamento foi visível em todas as estações utilizadas, exceto em EMIMB, que apresentou maiores variações mensais na técnica de ALTSAT. Apesar do exposto, os resultados foram satisfatórios, explicitando uma discrepância anual entre as técnicas em todas as estações maregráficas na casa dos milímetros.

Palavras-chave: Topografia do Nível "Médio" do Mar. Altimetria por Satélites. Missão CryoSat-2. Rede Maregráfica Permanente para Geodesia.

Abstract: The technique commonly applied to measure the local variations of the "Mean" Sea Level (NMM) and consequently of the "Mean" Dynamic Topography (MDT), has been based on a geodesic approach, in which tide gauges are installed on the coast oceanic. However, due to the difficulties in maintaining long time series, either due to the lack of financial resources for installation or technical difficulties for the installation of tide gauges or linimetric rulers, the use of altimetric satellite data (SATALT) is seen as an alternative. In view of this, the present study aims to propose a methodology to analyze the monthly variations of MDT based on data (SATALT) and maregraphy. For this purpose, the CryoSat-2 (CS2) mission and maregraphy data from EMFOR, EMSAL and EMIMB stations, all belonging to the Permanent Monitoring Network for Geodesy (PMNG) from February 2011 to September 2019. The results showed that the proposed methodology is feasible and can be used as a complement in tidal data. In a comparative analysis of the local variations of the MDT, it is verified, in general, that there was a more accentuated variation in the data of maregraphy when compared with SATALT, such behavior was visible in all the stations used, except in EMIMB, which presented greater monthly variations in the SATALT technique. Despite the above, the results were satisfactory, explaining an annual discrepancy between the techniques in all tide stations around the millimeters.

Keywords: "Mean" Dynamic Topography. Satellite Altimetry. CryoSat-2 Mission. Permanent Monitoring Network for Geodesy.

1 INTRODUÇÃO

A representação física que melhor descreve a forma real da Terra corresponde ao geoide, o qual se aproxima da superfície do Nível Médio do Mar (NMM) estendido sob os continentes, sem variação de corrente, vento, densidade de água, entre outros distúrbios. O estudo do geoide está associado a diversos estudos, dentre os quais um deles corresponde à definição de um sistema de altitudes, que por sua vez necessita da definição da altura de pontos na superfície terrestre em relação a uma referência vertical com sentido físico (expressa pelo geoide) (SANTOS, 2015; SOUZA; PALMEIRO, 2020).

Além da definição de um sistema de altitudes, destaca-se a importância do geoide na determinação das superfícies do NMM, em que o conhecimento da mesma possui grande interesse para estudos sobre as mudanças climáticas, definição de referenciais verticais e segurança da navegação. Porém, a partir da década de 1980, com o advento das modernas técnicas espaciais, foi evidenciado que existe uma discrepância entre o geoide e o NMM, sendo esta chamada de Topografia do Nível “Médio” do Mar (TNMM) (DA SILVA; FREITAS, 2019).

Sendo assim, devido ao vínculo com o geoide, a TNMM possui caráter físico e a sua negligência na determinação do sistema de altitudes, juntamente com inconsistências durante o ajustamento da rede altimétrica, propagam incertezas e ocasionam a não conexão entre os *data* verticais (HUANG, 2017; SILVA; GUIMARÃES, 2018).

No Brasil e na maioria dos países, uma rede oficial de nivelamento nacional é estabelecida para realizar o *datum* vertical geodésico, que tradicionalmente fornece uma referência para o levantamento de dados no campo para obras de engenharia, mapas topográficos, entre outros produtos e serviços. Com base nesta rede, a TNMM pode ser calculada por meio de registros maregráficos que mensuram as alturas dos níveis médios do mar em relação ao *datum* vertical (MAKANO; YAMADA, 1975; THOMPSON, 1980; HUANG, 2017). Porém, essa metodologia, no geral, apresenta limitações no que diz respeito à precisão da TNMM. Woodworth et al. (2012) demonstraram em sua pesquisa que o *Datum Vertical Geodésico Canadense (Canadian Geodetic Vertical Datum)* de 1928 (CGVD28) e o *Datum Vertical Norte Americano (North American Vertical Datum)* de 1988 (NAVD 88) não foram precisos o suficiente para estimar a TNMM ao longo dos oceanos Atlântico e Pacífico.

A determinação das variações do NMM e TNMM são realizadas comumente por meio de registros maregráficos na costa e com intervalos de tempo entre as observações. Porém em alguns locais não é possível obter dados maregráficos seja pela falta de recursos financeiros para instalação de marégrafos ou dificuldades técnicas para instalação de marégrafos ou réguas linimétricas. Além disso, tais observações são, na maioria das vezes, insuficientes, haja vista que são discretas (pontuais) e, assim, não conseguem representar de forma fidedigna a variação espacial do nível da água do mar. Nos últimos anos vem sendo desenvolvidas novas tecnologias no campo da geodésia, além de novos instrumentos para pesquisas oceanográficas, permitindo, assim, aperfeiçoar e complementar as antigas medições pontuais realizadas por marégrafos (PEIXOTO, 2007; REIS; PALMEIRO; BARBOSA, 2018a).

Neste sentido, a técnica de Altimetria por Satélites (ALTSAT) e as missões altimétricas vêm apresentando resultados satisfatórios em relação às escalas espaciais e temporais nas estimativas das alturas das superfícies do mar (do inglês *Sea Surface Height - SSH*) (AVISO, 2020). Os Estados Unidos lançaram em 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 (VIGNUDELLI et al., 2011). Além destas, a Agência Espacial Europeia (ESA - *European Space Agency*) foi responsável pelo lançamento dos satélites ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), Envisat (2002), CryoSat (2005), CryoSat-2 (2010), Sentinel-3A (2016) e Sentinel-3B (2018).

Devido à sua precisão e disponibilidade de informações, vários estudos vêm sendo desenvolvidos com base em dados da ALTSAT, proporcionando conhecimento em escala global e regional (DALAZOANA; LUZ; FREITAS, 2005; REIS; PALMEIRO; BARBOSA 2018a). Daher et al. (2015) realizaram um estudo que comparou os três modelos clássicos de componentes da maré com dados ALTSAT. A análise se deu através do método estatístico *Room Sum Squared* (RSS), exibindo diferenças de 12 cm nas regiões de águas profundas e exibiram resultados semelhantes em água rasas.

Já Da Silva e De Freitas (2019) analisaram a evolução temporal do *Datum Vertical Brasileiro* (DVB) de Imbituba a partir de séries temporais da associação de dados de posicionamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS), observações maregráficas e ALTSAT (multimissões de 1991 a 2015). Os resultados apresentaram estar em consonância com a visão de integração do *International Height Reference System* (IHRs) e evidenciaram uma taxa de elevação do NMM de +2,24 mm/ano na região do *Datum*.

A missão CryoSat-2 (CS2) foi a primeira missão europeia com o principal objetivo de medir a espessura do gelo, a fim de fornecer informações precisas para estudos sobre a relação entre o gelo e o clima global. O CS2 também é capaz de medir o nível do mar e pequenos fenômenos locais na superfície do oceano, com uma precisão sem precedentes. Além disso, diferente das outras missões, o altímetro embarcado nesta missão tem o potencial de mapear o nível do mar próximo à costa e alvos de águas interiores, como pequenos lagos e rios (ESA, 2020).

Neste sentido, a literatura científica apresenta alguns estudos sobre a TNMM com uso de observações do CS2, podendo-se citar Karimi, Andersen e Deng (2020), que utilizaram os dados de sete anos da missão CS2 com o objetivo de determinar a TNMM e comparar os dados de maregrafia da costa australiana e os dois modelos de TNMM globais. Comparado aos modelos globais, a TNMMCS2 exibiu altos valores, justificado pela elevação do mar. Em relação aos dados maregráficos, a TNMMCS2 apresentou resultados semelhantes e estatisticamente melhores do que os modelos globais na representação da TNMM da região.

Diante do exposto, este artigo visou prioritariamente mostrar a aplicação da ALTSAT por meio da missão CS2, como alternativa para as estimativas da TNMM ao longo da costa brasileira. Neste sentido, realizou-se um estudo comparativo das variações da TNMM por meio da ALTSAT em relação às técnicas de maregrafia, em algumas estações pertencentes à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMGP) no período de 2011 a 2019.

2 TOPOGRAFIA DO NÍVEL “MÉDIO” DO MAR (TNMM)

Atualmente, sabe-se que existe de fato uma separação entre o NMM local (para determinada data de observação) e o modelo geopotencial, essa discrepância corresponde à TNMM, do inglês *Mean Dynamic Topography* (MDT) (REIS; PALMEIRO; BARBOSA, 2018a). Tal superfície também é conhecida em outras literaturas como: Topografia Oceânica (TO) (Lopes, 2006), Topografia Dinâmica (TD) (Lopes, 2010) e Topografia da Superfície do Mar, do inglês *Sea Surface Topography* (SST) (TORGE, 2001; HAYDEN et al., 2012; SILVA; GUIMARÃES, 2018).

A TNMM é uma superfície dinâmica e seu valor médio depende do período de avaliação, podendo atingir ± 2 m em relação ao denominado geóide global (CHELTON et al., 2001). Esta variação faz com que os diferentes níveis da maré presentes ao longo da costa brasileira não representem a mesma superfície equipotencial. Assim não se pode usar os diferentes NMM ao longo da costa como injeção para uma única rede altimétrica. Devido a este fato, a maior parte da rede vertical brasileira está referenciada ao NMM observada em Imbituba – SC, apesar da propagação de erros aumentar conforme as Referências de Nível (RRNN) se afastam do *Datum* (SILVA; FREITAS; DALAZONA, 2016).

Em uma abordagem geodésica, a determinação da TNMM está diretamente associada aos modelos geopotenciais globais, tendo como referência um geopotencial global W_0 vinculado à um Sistema de Referência Vertical Global (SVRG). No entanto, a estimativa da TNMM é realizada por meio das diferenças de potenciais ΔW , ou seja, a diferença de potencial entre o *Datum Vertical Local* (DVL), de uma Rede Vertical Fundamental (RVF) e o SVRG, conforme Eq. (1) (SILVA; FREITAS; DALAZOANA, 2016).

$$TNMM_i = \frac{W_0 - W_i}{\gamma_i} \quad (1)$$

Em que, W_0 representa o potencial global de referência, W_i o valor do potencial no ponto i e γ_i corresponde ao valor da gravidade normal no elipsoide em determinada latitude geodésica. O γ_i pode ser calculado por meio da seguinte expressão da Somigliana, conforme demonstra a Eq. (2) (MORITZ, 1980;

SILVA; FREITAS; DALAZOANA, 2016):

$$\gamma_i = \frac{a\gamma_e \cos^2 \phi + b\gamma_p \sin^2 \phi}{\sqrt{a\gamma_e \cos^2 \phi + b\gamma_p \sin^2 \phi}} \quad (2)$$

Em que:

- a : corresponde o valor do semieixo maior do elipsoide de referência;
- b : o semieixo menor do elipsoide de referência;
- γ_e : a gravidade normal no Equador;
- γ_p : a gravidade normal nos polos; e
- ϕ : a latitude geodésica do ponto de interesse.

Com o avanço da tecnologia ALTSAT em estudos do monitoramento do NMM nas regiões costeiras, houve também o crescimento da aplicação da referida técnica em outros estudos, como por exemplo nas estimativas das topografias do nível médio do mar (TNMMs). Dessa forma, além da determinação da TNMM em uma abordagem geodésica, por meio de técnicas convencionais (maregrafia), destaca-se a importância de estudos de tal superfície através de uma abordagem oceânica utilizando a técnica de ALTSAT. No entanto, em ambas as abordagens e conforme demonstram as equações acima, o modelo geopotencial é de fundamental relevância nas estimativas das mesmas.

3 REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA (RMPG)

A Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) foi proposta em 1996 pela parceria da Coordenação de Geodésia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade Federal do Paraná (UFPR). Com o objetivo de auxiliar a vinculação temporal e espacial dos *Data Verticais* Brasileiros em relação aos demais níveis de referência maregráficos empregados na cartografia náutica e engenharia costeira (IBGE, 2016). Além da definição dos *Data Verticais*, a rede atua no monitoramento do NMM, por consequência na TNMM, e na modelagem matemática do Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG) (IBGE, 2016; CALADO; GARNÉS; JAMUR, 2018).

As estações da RMPG estão em conformidade com as diretrizes da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI), sendo compostas por, pelo menos, dois sensores de observação do nível do mar, para garantir a redundância dos dados e minimizar problemas de ausência de informação devido às falhas dos instrumentos (IBGE, 2020). Os tipos de maregrafos utilizados nas estações da RMPG são: radar; contrapeso, boia eletrônica e pressão hidrostática. Todas as estações da RMPG contribuem para a definição do Sistema Global de Observação do Nível do Mar (*Global Sea Level Observing System – GLOSS*), coordenado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (IBGE, 2020).

As observações maregráficas são enviadas a cada 5 minutos para o centro de controle da RMPG, situada na Coordenação de Geodésia na cidade do Rio de Janeiro, RJ, lá os mesmos são organizados em arquivos diários correspondentes às sessões que começam às 00:00 e terminam às 23:59 ou 23 do Tempo Universal Coordenado (TUC). A variação no encerramento das sessões depende da resolução temporal do sensor, que podem ser de 5 minutos ou 1 minuto (IBGE, 2020).

Após o recebimento dos dados são criados arquivos no formato .txt, nos quais são executados o controle de qualidade das observações, a reformatação do horário para o fuso de Brasília desconsiderando o horário de verão e por fim, uma filtragem das observações. Após esses processos, os arquivos de dados .txt são então compactados e disponibilizados na área de *downloads* do portal do IBGE (IBGE, 2020).

De acordo com Calado, Garnés e Jamur (2018) e IBGE (2020), atualmente a RMPG disponibiliza os dados maregráficos de sete estações ao longo da costa oceânica brasileira, são elas: EMIMB (Estação Maregráfica e Meteorológica de Imbituba – Santa Catarina), EMMAC (Estação Maregráfica de Macaé – Rio de Janeiro), EMSAL (Estação Maregráfica de Salvador – Bahia), EMFOR (Estação Maregráfica de Fortaleza – Fortaleza), EMSAN (Estação Maregráfica e Meteorológica de Santana – Amapá), EMBEL (Estação

Maregráfica de Belém – Belém) e EMARC (Estação Maregráfica e Meteorológica de Arraial do Cabo – Rio de Janeiro). Dessas seis estações, cinco delas estão atualmente ativas (a estação EMMAC está inativa desde 2015).

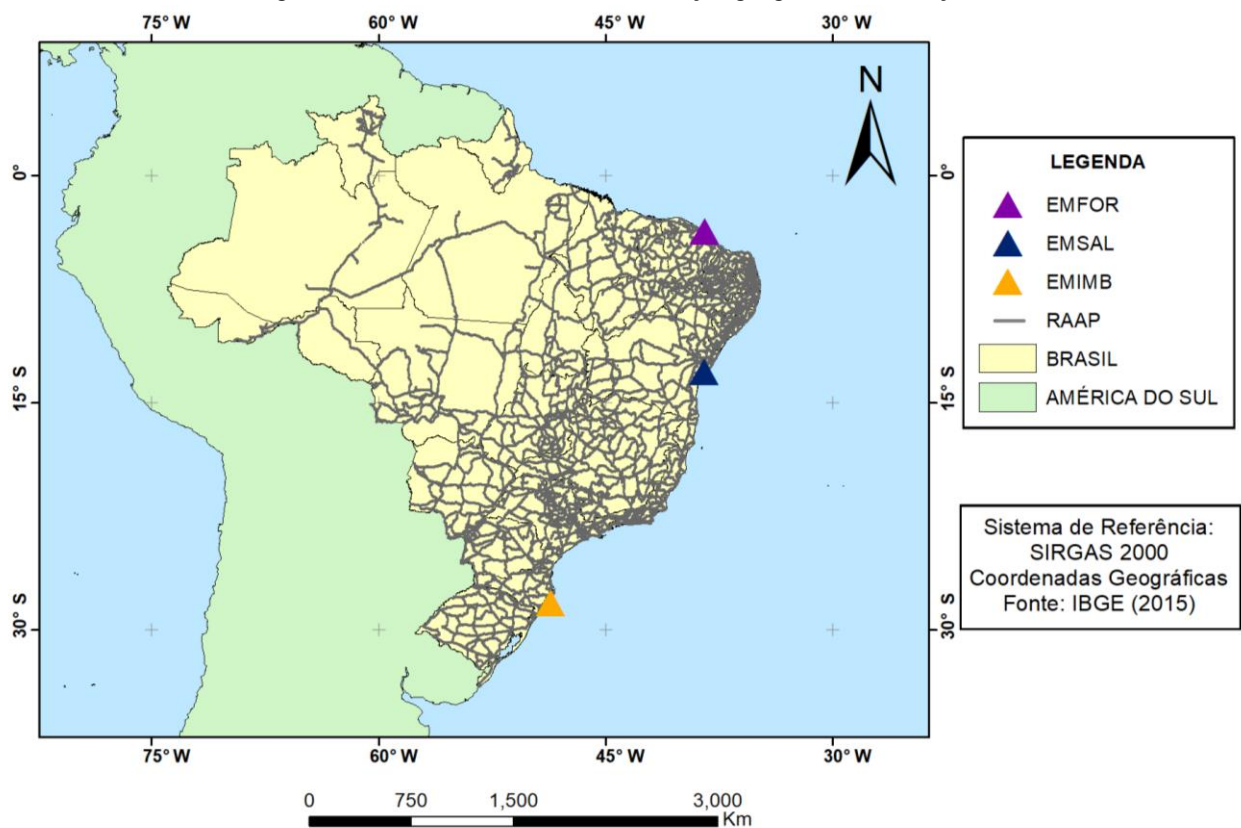
4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos próximos tópicos serão detalhados os métodos adotados na execução deste estudo, bem como, a determinação das TNMMs em diferentes técnicas e metodologias.

4.1 Área de Estudo

Nesta pesquisa foram utilizados dados (ADT e SLA) da missão altimétrica CS2 e observações maregráficas de algumas estações situadas na costa brasileira e pertencentes à RMPG. Devido às dificuldades na integração dos dados de ALTSAT com a parte continental, devido à influência dos efeitos de borda do sensor na interface oceano/continente, além da ausência de informações maregráficas equivalentes à série temporal da ALTSAT, optou-se por utilizar somente as estações: EMIMB, EMFOR e EMSAL neste estudo. A Figura 1 mostra a localização geográfica das estações que compõem a RMPG utilizadas neste estudo e a densificação da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) que teve a sua reformulação realizada em 2018.

Figura 1 – Área de estudo com a localização geográfica das estações.

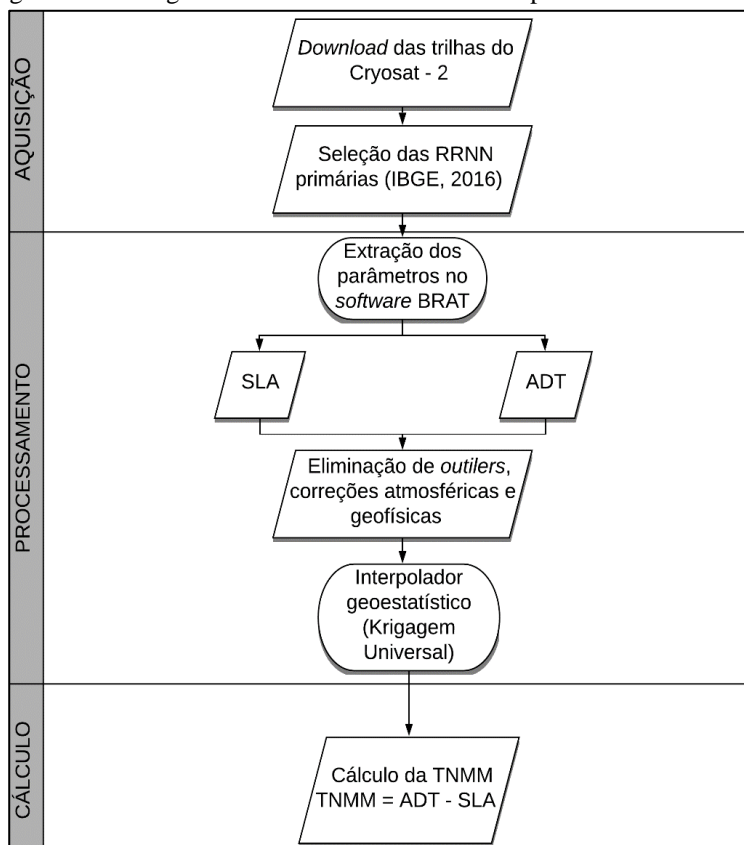


Fonte: Os autores (2021).

4.2 Determinação da TNMM por ALTSAT

A metodologia utilizada neste trabalho para determinação da TNMM seguiu as recomendações propostas por Pajak e Kowalczyk (2019). Neste sentido, o fluxograma abaixo demonstra as principais etapas que possibilitaram a determinação das variações da TNMM nas estações maregráficas utilizadas (Figura 2).

Figura 2 – Fluxograma das estimativas da TNMM por meio da ALTSAT.



Fonte: Os autores (2021).

Os dados de ALTSAT são criptografados e encontram-se disponíveis em extensão .nc (NetCDF-*Network Common Data Form*), sendo necessário aplicar um *software* específico para o tratamento dos mesmos. Para isto, utilizou-se o *software* livre BRAT (*Broadview Radar Altimetry Toolbox*) versão 4.2.1 (ROSMORDUC et al., 2016), o 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.

Após a obtenção dos dados de SLA e ADT obtidas pelo CS2, referentes ao período de fevereiro de 2011 a setembro de 2019 na plataforma da CMEMS, importou-se os arquivos com a extensão .nc para o BRAT e, posteriormente aplicou-se o retângulo envolvente com as coordenadas geográficas no entorno dos marégrafos pertencentes à RMPG, com a finalidade de extrair informações de Latitude, Longitude, SLA e ADT apenas da região de interesse. Em seguida, estas informações foram exportadas em formato ASCII. A escolha desta extensão se deve ao fato da mesma ser compatível com o *software* ArcGis (ESRI, 2020), este devidamente licenciado nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil (DEC) na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Vale ressaltar que os dados de SLA e ADT possuem uma resolução espacial de 14 km e estão referenciados ao modelo geopotencial global EGM2008. Desta forma, foi necessário estimar as lacunas entre as trilhas do satélite a partir de um interpolador matemático. Devido às características estatisticamente ótimas (estimativa sem viés e com variância mínima) (Matheron, 1967 e Cressie, 1990), optou-se por empregar um interpolador Geoestatístico, em especial, a Krigagem Universal (KU), conforme recomenda Ferreira, Santos e Rodrigues (2013). As análises foram conduzidas através do *software* ArcGis versão 10.5 da *Environmental Systems Research Institute* (ESRI). Por convenção optou-se por utilizar dados mensais, uma vez que, a missão CS2 não possui resolução temporal diária e na maregráfica as leituras são gravadas e disponibilizadas ao usuário a cada 5 minutos.

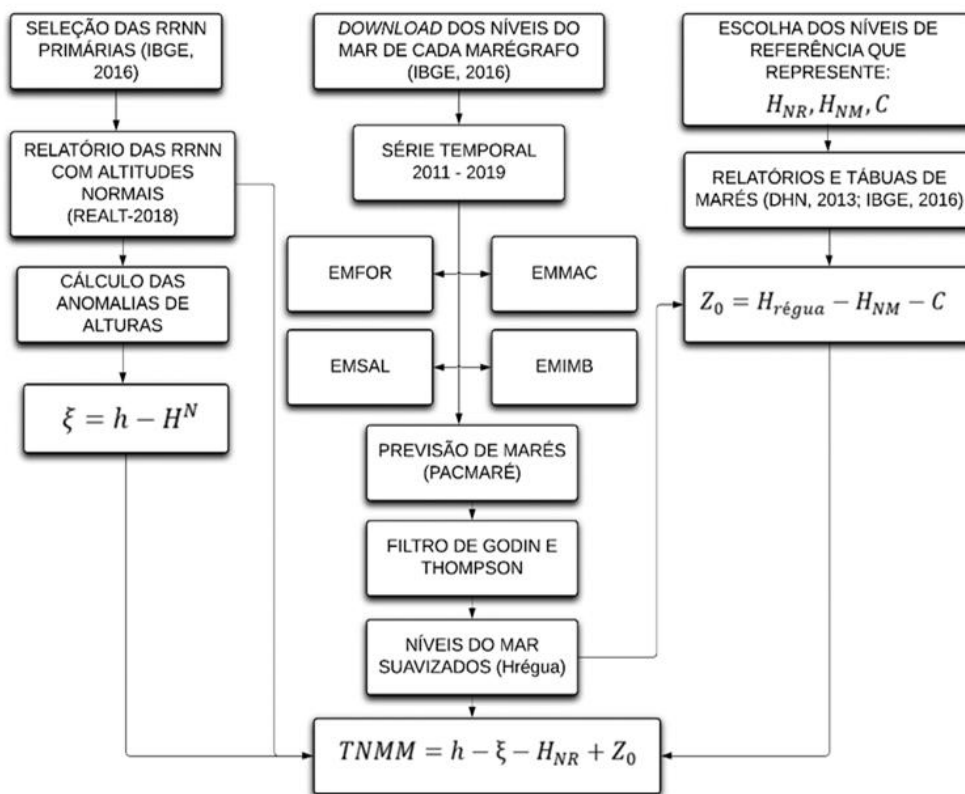
Sendo assim, de posse das informações mensais de SLA e ADT, utilizaram-se as relações entre as superfícies com a finalidade de estimar a TNMM através de ALTSAT na região, conforme apresentada na Eq (3) a seguir (AVISO, 1996):

$$TNMM = ADT - SLA \tag{3}$$

4.3 Determinação da TNMM por maregrafia

A metodologia utilizada para determinação da TNMM por meio de uma abordagem clássica, ou seja, através da maregrafia, seguiu-se as recomendações propostas por Hayden et al. (2012) e Andersen et al. (2018). A Figura 3 exibe o fluxograma adotado.

Figura 3 – Fluxograma geral das estimativas da TNMM através da técnica de maregrafia.



Fonte: Os autores (2021).

Para a estimativa da TNMM nos marégrafos da RMPG foram utilizados dados maregráficos contidos no banco de dados do IBGE para cada conjunto de Estações/Data, tendo o formato do tipo texto (.txt) e contendo leituras do nível do mar (IBGE, 2016). Apesar do IBGE apresentar um banco de dados com informações no nível d’água para todas as estações pertencentes à rede, a base de dados apresenta falhas nas observações devido aos diversos períodos de inatividade das estações e falhas nos sensores (IBGE, 2016). Visando minimizar tais problemas foi necessário realizar a previsão dos dados faltantes, para isto fez-se o uso dos módulos ANALEXEC e PREVISÃO do *software* PACMARÉ versão 2003 (FRANCO, 1988).

O *software* PACMARÉ (Previsão Harmônica e Análise de Marés) foi desenvolvido e idealizado por Franco (1988) com o objetivo principal de estimar as alturas de marés através de constantes harmônicas obtidas por meio de análises realizadas pelo método harmônico. Seu pacote de programas utiliza a técnica de decomposição de um conjunto periódico não-sinusoidal baseado no teorema de Fourier. Além disso, o *software* permite a utilização da rejeição percentual de pequenos componentes estabelecidos pelo usuário e analisa até 13 tipos de componentes diários para indicar o número de ciclos para a espécie analisada (RIBEIRO, 2008; COELHO, 2016).

Para realizar a previsão dos dados faltantes, inicialmente obteve-se as constantes harmônicas por meio do módulo ANALEXEC. Nele é possível realizar a análise harmônica dos dados de marés ou de correntes de marés no domínio da frequência. As previsões de maré podem ser obtidas a partir do resultado da análise harmônica de observações maregráficas. Tais análises têm como objetivo reproduzir parâmetros significativos,

estáveis no tempo, que descrevem o regime das marés em relação a interação entre a Terra, Sol e Lua no local de observação.

Os parâmetros são frequentemente denominados componentes harmônicos de maré, e estão relacionados fisicamente ao processo de geração da maré, além de considerar uma estabilidade de característica regional. Desta forma, pressupõe-se que empregando 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, neste estudo considerou-se um período mínimo de 32 dias e os resultados da análise harmônica dos dados produziram componentes aproximadas do valor verdadeiro. Porém, quanto maior o período de dados disponível para análise, maior será a proximidade dos valores reais (PUGH, 2001).

De posse das constantes harmônicas de cada estação maregráfica, utilizou-se o módulo PREVISÃO (previsão das marés ou correntes) que permitiu a estimativa da previsão do nível do mar dos períodos de dados faltantes. Além disso, as previsões de marés são essenciais para a aplicação dos filtros passa-baixa de Thompson e Godin (utilizados no cálculo do Nível “Médio” do Mar), pois os mesmos só podem ser utilizados caso não haja dados faltantes.

Os dados ALTSAT provenientes da missão altimétrica CS2 são disponibilizados na plataforma da CMEMS com diversas correções, dentre elas, a eliminação de dados espúrios e *outliers*, correção dos efeitos atmosféricos (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, 2020). No entanto, os dados de maregrafia foram submetidos apenas à eliminação de dados espúrios e *outliers* não havendo, assim, suavizações, mantendo em seu valor puro.

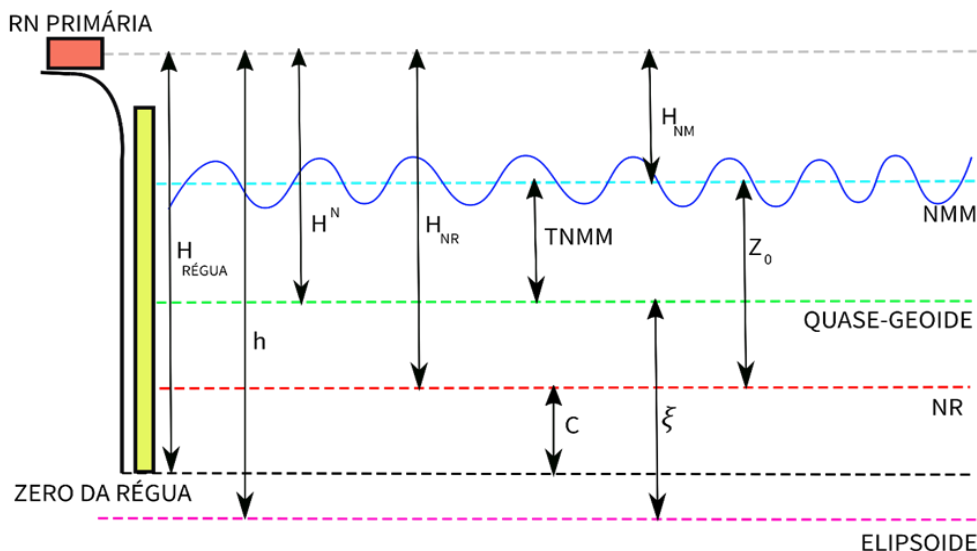
Desse modo, visando atenuar as componentes astronômicas e inerciais, e suavizar os valores do nível d'água provenientes da RMPG, fez-se necessário a aplicação dos filtros passa-baixa de Thompson e Godin no módulo NIMED através do *software* PACMARE. O filtro de Thompson foi proposto em 1983 e permite que o usuário suavize as frequências de interesse e otimize seu desempenho por meio da seleção de parâmetros de cálculo. Porém, o filtro exige complexidade em sua implementação e elevado esforço computacional, uma vez que a definição na seleção das frequências ocasiona a piora no ajustamento da função de resposta (THOMPSON, 1983; COSTA, 2010).

O filtro de Godin (1972) consiste em um filtro de simples implementação, o 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).

Os filtros passa-baixa são comumente utilizados em estudos oceanográficos, como mostra: i) Godínez et al. (2000) ao aplicarem filtros passa-baixa nas análises de dados meteorológicos e de correntes no Alto Golfo da Califórnia; ii) Costa (2010), no qual realizou filtragens numéricas e análises espectrais para avaliar as influências das tensões do vento na variação do NMM na região costeira de Cananéia (SP) e iii) Antunes e Godinho (2011) aplicaram os filtros de Thompson e Godin para o estudo das análises harmônicas e da marés no marégrafo de Cascais em Lisboa (Portugal).

Após a suavização das observações dos níveis do mar através do filtro de Godin, e a eliminação dos *outliers*, realizou-se a análise das superfícies de referências adotadas pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e IBGE, com o objetivo de estimar as variações temporais da TNMM para cada estação pertencente à RMPG. A Figura 4 ilustra as relações entre os níveis de referência que proporcionaram as estimativas da TNMM.

Figura 4 – Relação entre as superfícies de referências utilizadas na maregrafia.



Fonte: Adaptada de Hayden et al. (2012) e IBGE (2016).

Os níveis de referência representados na Figura 4 correspondem ao Elipsoide adotado, Zero da régua, Nível de Redução (NR), Quase-Geoide e Nível “Médio” do Mar Local. Além disso, observa-se a representação da altitude elipsoidal (h), Altura da RN em relação ao zero da régua ($H_{régua}$), Altura da RN em relação do NR (H_{NR}), Altitude hidrográfica da RN (H_{NM}), distância entre o nível zero da régua e o nível de redução (C), anomalia de altura (ξ), semi-amplitude máxima da onda de maré (Z_0), a Topografia do Nível “Médio” do Mar ($TNMM$) e a altitude normal (H^N). A $TNMM$ é calculada pelas Eqs. (4 e 5), apresentadas na sequência (HAYDEN et al., 2012; ANDERSEN et al., 2018).

$$TNMM = h - \xi - H_{NR} + Z_0 \tag{4}$$

$$Z_0 = H_{régua} - H_{NM} - C \tag{5}$$

Visando padronizar todas as superfícies para um único referencial, utilizou-se como base a régua da DHN. Sendo assim, foi realizado o transporte das alturas das régua do IBGE para as régua da DHN, somando-se a diferença de nível entre as mesmas. O Banco de Dados Geodésicos (BDG), do IBGE, disponibiliza as altitudes elipsoidais e normais das referências de níveis (RN) primárias das estações. Através destas superfícies, realizou-se, em concordância com Heiskanen e Moritz (1967), o cálculo da anomalia de altura ou altura quase-geoidal (ξ), por meio da diferença entre o valor da altitude geométrica (h_{GNSS}) e a altitude normal (H^N).

$$\xi = h_{GNSS} - H^N \tag{6}$$

A anomalia de altura (proposta por Molodenski) é um elemento importante, pois permite a 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 referência local. Já a ALTSAT realiza as mensurações em relação a um elipsoide e modelo geopotencial global. Sendo então necessário compatibilizar as superfícies de referência das duas técnicas (PAJAK; KOWALCZYK, 2019).

Neste sentido, as anomalias de alturas utilizadas neste estudo foram calculadas em relação às altitudes normais propostas pelo Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais propostas pelo IBGE em 2018. A Tabela 1 relaciona os valores das altitudes normais e elipsoidais de acordo com as RRNN primárias de cada estação.

Tabela 1 - Altitudes geométricas e normais das RRNN primárias das estações.

Estação	RRNN	h (m)	H^N (m)
Fortaleza	4336A	-5,3663	3,6712
Salvador	3640A	-8,661	2,4110
Macaé	3086U	-3,408	3,3884
Imbituba	3012X	3,3539	2,0449

Fonte: IBGE (2020).

As alturas das réguas correspondem às variações do nível do mar em relação às RRNN primárias de cada estação maregráfica e as alturas H_{NR} e H_{NM} foram obtidas por meio de observações das tábuas de maré da DHN e relatórios técnicos fornecidos pelo IBGE. Todos os parâmetros relativos às superfícies de níveis utilizadas na maregrafia são monitorados, atualizados e disponibilizados pelo IBGE e DHN. A Tabela 2 relaciona os valores de H_{NR} e H_{NM} de acordo com as RRNN de cada estação maregráfica.

Tabela 2 - Altura da RN primária acima do NMM local e altura da RN primária acima do NR.

Estação	RRNN	H_{NM} (m)	H_{NR} (m)
Fortaleza	4336A	3,244	4,789
Salvador	3640A	1,655	3,265
Macaé	3086U	4,377	4,197
Imbituba	3012X	2,042	2,406

Fonte: DHN (2013) e IBGE (2016).

Por fim, fez-se o cálculo das variações anuais e a comparação de todos os resultados da TNMM através das técnicas de maregrafia e ALTSAT. No entanto, as séries temporais derivadas das estações da RMPG em comparação com a ALTSAT não apresentam correlação linear, uma vez que, as variáveis estão diretamente associadas às coordenadas geográficas de cada estação maregráfica em estudo.

Portanto, diante da impossibilidade de aplicar correlação linear entre as variáveis, compete à Geoestatística o conjunto de técnicas necessárias para entender a aparente aleatoriedade dos dados os quais apresentam estruturação espacial, estabelecendo, desse modo, uma função de correlação espacial. Neste estudo, a Geoestatística forneceu base para aplicação de métodos de interpolação que possibilitaram as estimativas de dados não amostrados.

Cabe ressaltar que os valores de TNMM obtidos através da maregrafia estão associados ao modelo geopotencial global utilizado no contexto do Sistema Geodésico Brasileiro (SBG), e as TNMMs oriundas do CS2 estão diretamente relacionados ao modelo geopotencial EGM2008. Devido a isso, as análises das variações temporais não são somente oceânicas com variações locais do nível do mar, mas também, expressam as diferenças de potenciais relativas as duas técnicas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os parâmetros e resultados que permitiram analisar a influência da TNMM por meio das técnicas de maregrafia e ALTSAT. No entanto, ao realizar a comparação entre as técnicas 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 (DA SILVA; DE FREITAS, 2019). Tais condições foram atendidas, uma vez que se utilizou dados mensais, para ambas as técnicas, ao longo de fevereiro de 2011 a setembro de 2019.

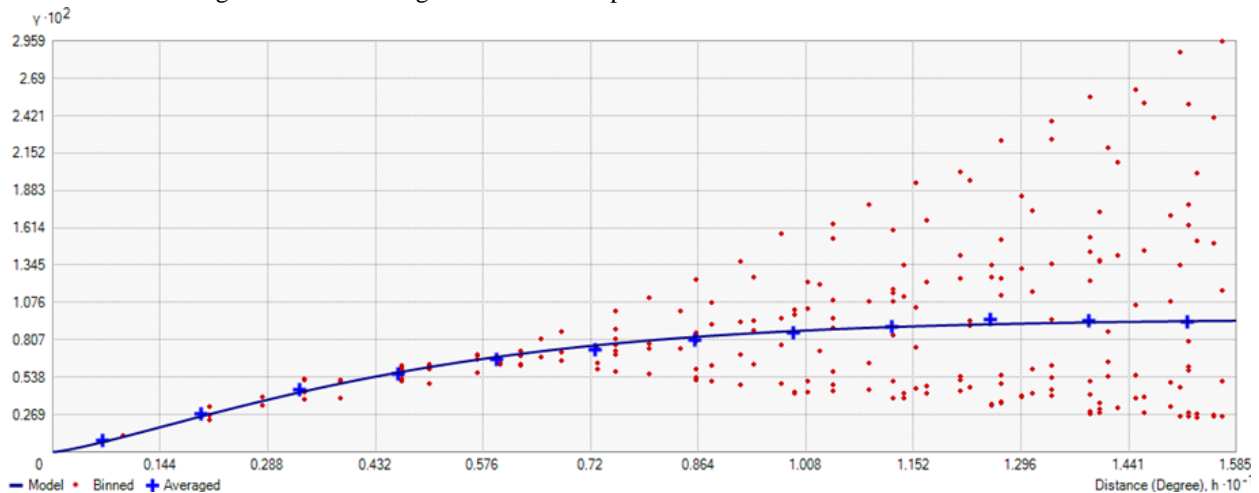
5.1 Análise Geoestatística

As missões altimétricas disponibilizam suas trilhas com uma resolução espacial que geralmente não abrange a região das estações maregráficas. No entanto, visando minimizar tais efeitos, torna-se necessário a aplicação de um interpolador Geoestatístico para estimar os valores de TNMM para os locais não amostrados.

Para isto, fez-se o uso da KU e o ajuste do semivariograma. A Figura 5 mostra o comportamento do

semivariograma omnidirecional experimental e o modelo ajustado.

Figura 5 - Semivariograma da TNMM por meio do CS2 em toda costa brasileira.



Fonte: Os autores (2021).

Os pontos representados em vermelho representam o conjunto amostral, ou seja, os valores de TNMM da costa brasileira, as cruces em azul, as semivariâncias estimadas e a curva azul o modelo exponencial de primeiro grau que melhor se ajustou ao conjunto de dados. Ressalta-se que todas as análises apresentadas neste tópico correspondem ao comportamento dos dados oriundos de toda costa oceânica brasileira, uma vez a ALTSAT fornece um *grid* com os valores de ADT e SLA.

A utilização da KU foi baseada em estudos de Ferreira, Santos e Rodrigues (2013) que realizaram um estudo sobre a utilização adequada da Krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas, e mediante aos resultados apresentados nesta dissertação, foi o interpolador que melhor estimou o parâmetro em análise. Tal justificativa foi confirmada através do semivariograma representado na Figura 8, que demonstra que o efeito pepita no eixo das ordenadas, ou seja, o espaçamento da amostragem dos dados do CS2 após a interpolação foi satisfatório e igual a 0 m, sendo considerados ideais na Geoestatística.

Além disso, verificou-se a presença de um raio de ação praticamente idêntico em todas as direções, ou seja, uma condição de isotropia. O alcance máximo representa a variação máxima no qual pode ser correlacionada espacialmente com a TNMM, e foi estimada em 11,794 graus decimais. Já o patamar, que representa a máxima dispersão nos valores de TNMM foi de 1,270 m. A Tabela 3, representa as estatísticas descritivas dos valores de TNMM obtidas na validação cruzada.

Tabela 3 - Estatística descritiva resultantes da validação cruzada.

Análises descritivas	
Número de pontos	23875
Média máxima dos erros (m)	0,002
RMS máximo (m)	0,461

Fonte: Os autores (2021).

Outro parâmetro importante na análise da aplicação da KU, são os ‘lag size’ e o ‘number of lags’. O *Lag* corresponde à distância entre os pares nos quais o semivariograma é calculado, ‘number of lags’, representa o número de *lags* que devem ser calculados no semivariograma e ‘lag size’ especifica o tamanho da distância entre os pares.

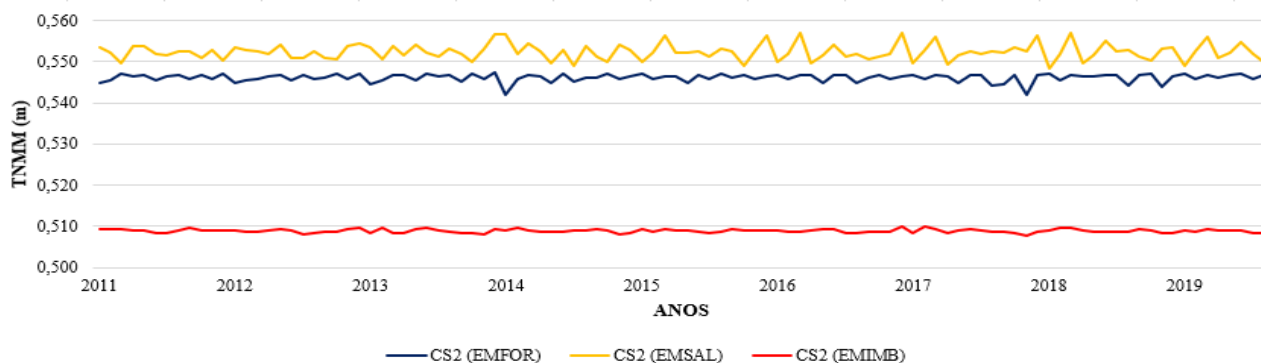
Na ferramenta *Geostatistical Analyst* do *software* ArcGIS o ‘number of lags’ foi padrão, com um valor correspondente a 12. No entanto, o ‘lag size’ foi calculado através da ferramenta do *software* e obteve um valor correspondente a 1,320491 em graus decimais.

5.2 Análise das variações das TNMMs por meio das técnicas de ALTSAT e maregrafia

Após a interpolação dos valores das TNMM para toda extensão da costa oceânica brasileira, realizou-se um estudo comparativo das variações locais para a ALTSAT e maregrafia para as estações EMFOR, EMSAL e EMIMB.

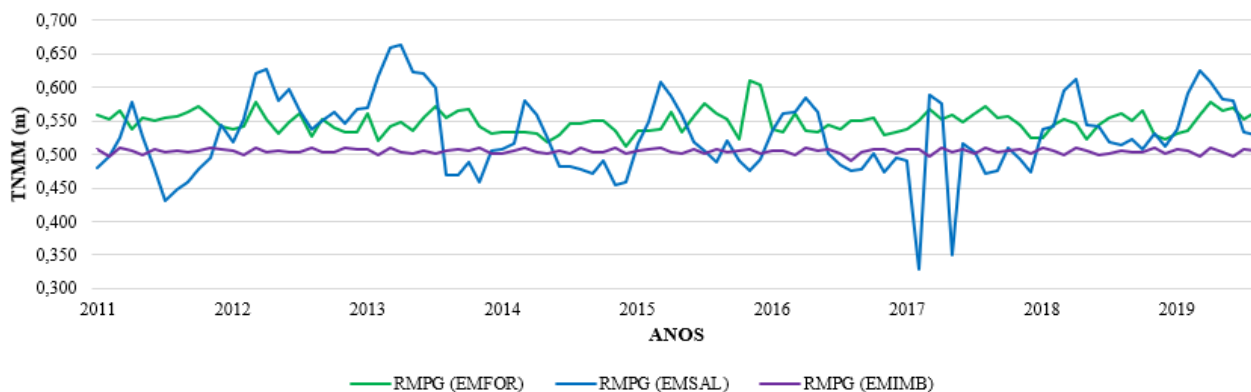
A seguir, nas Figuras 6 e 7 estão ilustradas respectivamente as variações mensais locais por meio das técnicas de ALTSAT e a maregrafia. Já a Figura 8, representa as comparações em metros entre as variações locais por ambas as técnicas. Todos os gráficos foram elaborados em escalas diferenciadas com a finalidade de melhor ilustrar os picos identificados.

Figura 6 – Variações mensais em metros da TNMM de acordo com a ALTSAT.



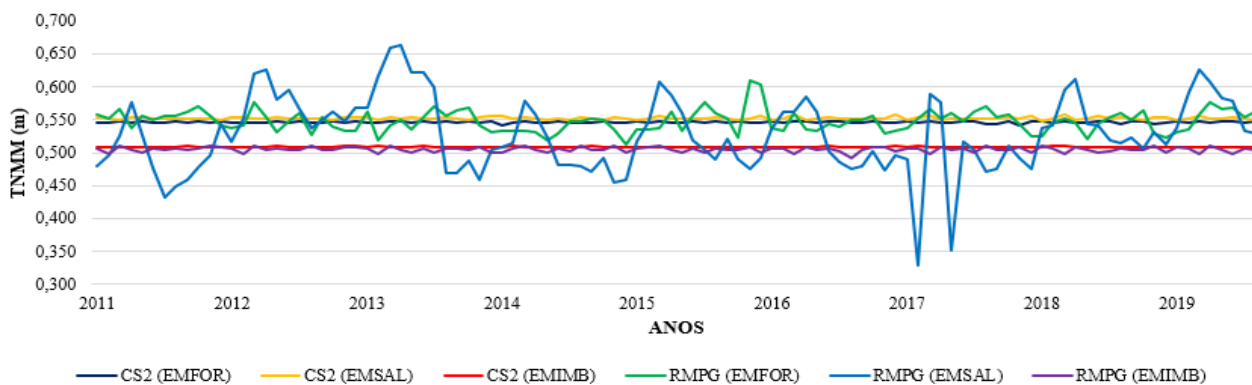
Fonte: Os autores (2021).

Figura 7 – Variações mensais em metros da TNMM de acordo com a maregrafia.



Fonte: Os autores (2021).

Figura 8 – Comparação mensal em metros das variações locais por ambas as técnicas.



Fonte: Os autores (2021).

Na Tabela 4 apresenta-se um resumo quantitativo das principais análises estatísticas e os anos em que as variações das TNMMs apontaram picos significativos.

Tabela 4 – Resumo quantitativo referente às análises das variações das TNMMs.

Estação	Análise	TNMM _{CS2} (m)	TNMM _{RMPG} (m)	Picos (elevações / quedas) (m)
EMFOR	Desvio Padrão	0,001	0,017	2014 (0,547) e 2017 (0,542)
	Amplitude	0,005	0,099	
EMSAL	Desvio Padrão	0,002	0,057	2016 (0,557); 2017 (0,558); 2017 (0,327) e 2018 (0,557)
	Amplitude	0,009	0,336	
EMIMB	Desvio Padrão	0,004	0,0004	2015 (0,511) e 2016 (0,492)
	Amplitude	0,019	0,002	

Fonte: Os autores (2021)

Na EMFOR, conforme a Figura 6 e Tabela 4, foi possível identificar na técnica de ALTSAT quedas acentuadas em janeiro de 2014 e dezembro de 2017, em que obtiveram valores de 0,547 m e 0,542 m, respectivamente. As variações da TNMM estão diretamente associadas ao modelo geopotencial global e as variações locais das anomalias do nível do mar. Sendo assim, a influência de eventos sísmicos e meteorológicos são algumas das justificativas para os picos evidenciados na referida técnica. Mediante a isso, ressalta-se ainda os efeitos dos fenômenos oceânico-atmosférico El Niño e La Niña, que são responsáveis, respectivamente, pelo aquecimento e resfriamento da camada mais superficial do Oceano Pacífico (KAYANO et al., 2016; MOHAMMADI; GOUDARZI, 2018).

De acordo com INPE (2020), os últimos episódios destes eventos foram identificados em 2015-2016, a ocorrência do El Niño classificado de forte intensidade e La Niña em 2017-2018 classificada como moderada. Portanto, tais efeitos podem ter contribuído para a diminuição do nível médio mar e consequentemente das TNMMs, nos períodos de janeiro de 2014 e dezembro de 2017.

Em relação às variações médias mensais da TNMM por meio da maregrafia, na Figura 7, percebe-se que os dados derivados da RMPG apresentaram maiores variações ao serem comparados com a ALTSAT, em que tal afirmativa foi justificada pelas amplitudes e desvios padrões mais significativos (Tabela 4). Alguns autores, como Silva e Guimarães (2018) obtiveram valores de TNMM distintos para diversos modelos geopotenciais, tais como, o GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 e MAPGEO2015. No entanto, para o EIGEN-6C4, que corresponde ao MGG de referência para a composição do SBG, os autores concluíram que a TNMM apresentou valor de 0,419 m para a EMFOR.

No que refere-se à EMSAL, de acordo com a Figura 6 e Tabela 4, foi possível identificar na técnica de ALTSAT que os anos de 2016, 2017 e 2018, foram os que apresentaram maiores variações em suas topografias, com respectivamente, 0,557, 0,558 e 0,557 m. Dentre eles, destacando-se o ano de 2017, que apresentou maior TNMM em relação ao período em análise. No entanto, ao analisar as variações na técnica de maregrafia, evidenciou-se dois picos de queda em 2018, em que no mês de março verificou-se uma TNMM de 0,327 m relação à série temporal utilizada neste estudo (Figura 7).

Sendo assim, destaca-se a manutenção e recuperação das séries temporais dos dados de ALTSAT, o estudo da superfície dinâmica dos oceânicos de acordo com cada missão altimétrica, as diversas bases de dados, resoluções espaciais e referenciais distintos, que por sua vez ocasionam incertezas no nível do mar e consequentemente nas estimativas da TNMM (DALAZOANA, 2005; PALMEIRO, 2011; DA SILVA; DE FREITAS, 2019).

Em relação às variações sazonais da TNMM por meio da maregrafia, Figura 7, foi constatado que os dados derivados da RMPG apresentaram maiores variações ao serem comparados com a ALTSAT. A partir da Tabela 4 foi possível identificar maior diferença nos valores de máximo e mínimo para dados da RMPG do que para ALTSAT. Diferença quantificada pelas amplitudes de 0,009 m e 0,336 m para ALTSAT e maregrafia, respectivamente. O desvio padrão reflete a dispersão de um conjunto de dados, caracterizando a confiabilidade deste conjunto. O desvio padrão do CS2 foi menor que da maregrafia, com valores de 0,002 m e 0,057 m, respectivamente.

Desse modo, esta estatística também reflete o que foi discutido anteriormente, que a ALTSAT apresenta menor dispersão nos valores em relação aos dados de maregrafia. Uma vez que, os dados provenientes da ALTSAT são acrescidos de correções de órbita, correções atmosféricas e geofísicas,

eliminação de dados espúrios, mitigação dos efeitos das cargas oceânicas, dentre outras, ao passo que os marégrafos provenientes da RMPG passam apenas por correções de dados espúrios.

Portanto, ressalta-se outras influências para a maior variabilidade dos resultados da TNMM por maregrafia na EMSAL, como os movimentos efetivos da crosta que ocasionam movimentos eustáticos e tectônicos e a dificuldade na integração das observações maregráficas com a ALTSAT (DALAZOANA, 2005; SILVA; FREITAS; DALAZOANA, 2016). Ao realizar uma comparação dos valores de TNMM encontrados na EMSAL, com o estudo de Reis, Palmeiro e Barbosa (2018b), evidenciou-se pequenas diferenças para ambos os trabalhos, uma vez que, os autores estimaram uma variação média anual de $0,55 \pm 0,006$ m para o modelo *Global Mean Dynamic Topography – MDT_CNES_CLS13*.

No que refere-se à EMIMB, de acordo com a Figura 6 e a Tabela 4, a técnica de ALTSAT apresentou variações expressivas em todos os anos correspondentes à série temporal, em que o mês de setembro de 2015 apontou elevado pico em sua TNMM, com aproximadamente 0,511 m. No entanto, em setembro de 2016 houve uma diminuição de 19,3 mm das TNMM em relação ao período de análise.

Mediante as dificuldades de integração da ALTSAT com a vinculação da PVCG, associadas as constantes correções instrumentais, derivas e movimentos da crosta na região do marégrafo, percebeu-se que na EMIMB as variações da TNMM foram mais significativas pela ALTSAT do que na técnica de maregrafia, demonstrando um comportamento contrário em relação as demais estações.

Tal afirmativa é justificada por meio da Tabela 4, em que evidenciou-se maiores amplitudes para os dados de ALTSAT do que para os dados de maregrafia. Em que, as amplitudes variam de 0,019 m para ALTSAT e 0,002 para maregrafia.

Além das amplitudes, que justificam as variações acentuadas da ALTSAT, o desvio padrão reflete as variações da TNMM em torno de sua média, demonstrando que a técnica de ALTSAT foi mais expressiva. Em que, o desvio padrão da missão altimétrica foi de 0,004 m e 0,0004 m para maregrafia. Os resultados encontrados na EMIMB podem ser comparados com os estudos de Abarici et al. (2021), em que realizaram o cálculo da SST utilizando uma superfície equipotencial de referência local, obtendo um valor de $0,387 \pm 0,018$ m e os estudos de Reis, Palmeiro e Barbosa (2018b), onde estimaram uma variação de aproximadamente, $0,51 \pm 0,013$ m. No entanto, vale ressaltar que todos os autores citados nas discussões, aplicaram materiais e métodos distintos, podendo-se assim explicar as discrepâncias entre as variações das TNMMs apresentadas.

5.3 Análise das discrepâncias entre as técnicas de ALTSAT e maregrafia

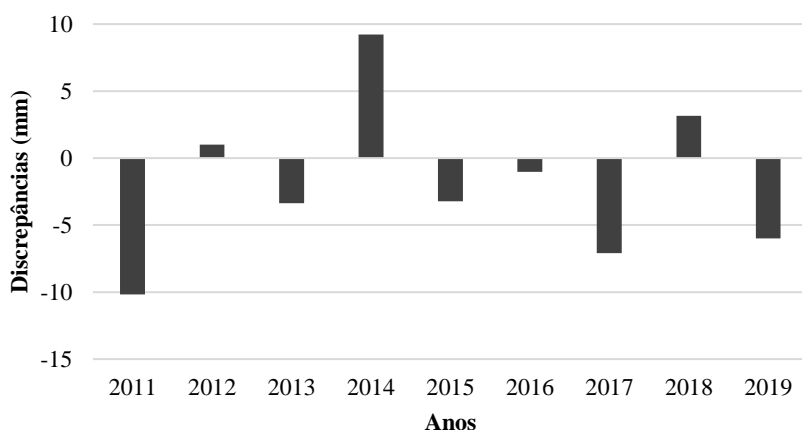
Neste tópico serão apresentadas as análises das discrepâncias entre as técnicas, no qual a Tabela 5 representa as discrepâncias anuais em milímetros entre a ALTSAT e a maregrafia, e as Figuras 9, 10 e 11 demonstram os gráficos das discrepâncias entre as técnicas para a EMFOR, EMSAL e EMIMB, respectivamente.

Tabela 5 – Discrepâncias anuais em milímetros entre a técnicas de ALTSAT e maregrafia.

Referência	EMFOR (mm)	EMSAL (mm)	EMIMB (mm)
2011	-10,178	62,029	-4,237
2012	1,000	-14,418	-3,305
2013	-3,358	-14,380	-3,957
2014	9,211	48,702	-4,232
2015	-3,228	29,252	-4,001
2016	-1,025	34,465	-5,174
2017	-7,089	69,610	-4,002
2018	3,164	16,078	-4,537
2019	-5,987	-13,988	-4,905
Média	-1,748	24,886	-4,243
Total	-181,747	2588,139	-441,252

Fonte: Os autores (2021).

Figura 9 – Gráfico das discrepâncias entre as técnicas na EMFOR.

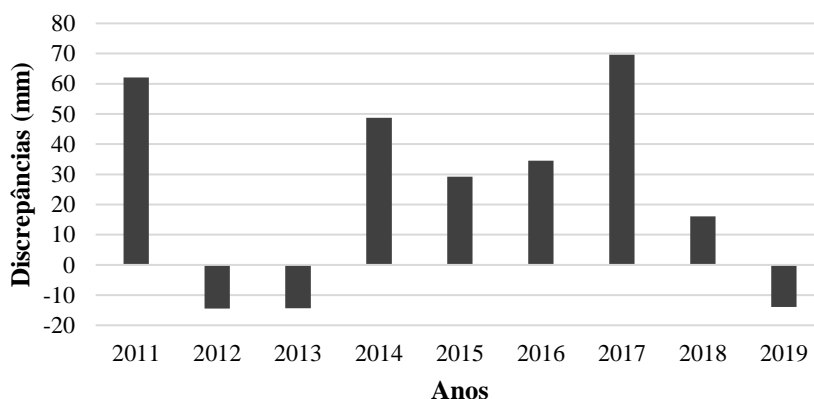


Fonte: Os autores (2021).

Ao analisar as discrepâncias na EMFOR, com base na Figura 9 e Tabela 5, constatou-se que os valores de discrepância maior (9,211 mm) e menor (-10,178 mm) foram identificados exatamente nos picos correspondentes a 2011 e 2014. Logo, reafirmando que pode ter sofrido influências de efeitos climáticos anômalos (Kayano et al., 2016). No entanto, apesar da influência dos movimentos da crosta e fenômenos climáticos que afetam as leituras na EMFOR, a discrepância média entre o CS2 e maregrafia foi de - 1,748 mm.

Porém, de forma geral os valores da TNMM encontrados em ambas as técnicas, diferem com os valores encontrados no modelo geopotencial EIGEN-6C4, modelo que compõem o SGB, em aproximadamente 12,79 cm. Essa desigualdade foi calculada por meio da diferença das TNMM estimadas pelo EIGEN-6C4 e a média das TNMM entre a ALTSAT e a maregrafia.

Figura 10 – Gráfico das discrepâncias entre as técnicas na EMSAL.



Fonte: Os autores (2021).

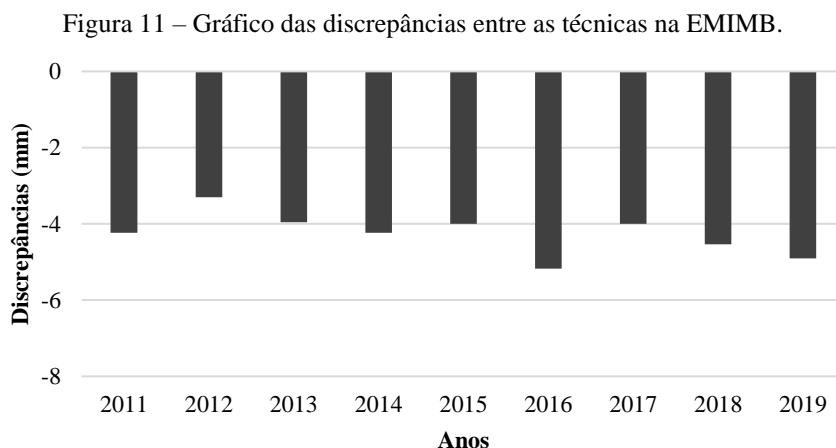
Em relação à EMSAL, de acordo com a Figura 10 e a Tabela 5, constatou-se que os valores de discrepância maior (69,610 mm) e menor (-13,988 mm) foram identificados exatamente nos picos correspondentes aos anos de 2017 e 2019. Logo, cada técnica está sujeita a diversas incertezas associadas à determinação das TNMMs, onde os efeitos climáticos anômalos, por exemplo, as chuvas e secas anormais influenciam diretamente nas alturas do nível do mar e conseqüentemente nas estimativas da TNMM.

Além desta incerteza, o relatório do IBGE (2016) que dispõe sobre as análises do nível do mar nas estações da RMPG, mostra uma significativa movimentação de recalque em relação à RN principal da estação maregráfica situada no píer. No entanto, isolando o píer do quebra-mar, em uma comparação com a RN no continente, o Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM) fornece um recalque de 1 mm/ano.

A propagação deste recalque pode ter influenciado nas estimativas do nível do mar referente as leituras

da EMSAL e conseqüentemente em suas TNMM. Apesar do exposto, a discrepância média entre as técnicas foi de 24,886 mm.

De forma geral a discrepância obtida através das diferenças das TNMMs do EIGEN-6C4 e a média das TNMM nas duas técnicas, foi de, aproximadamente 13,50 cm, concluindo que as desigualdades entre os modelos geopotenciais globais ficaram na casa dos centímetros.



Fonte: Os autores (2021).

Por fim, na EMIMB, com base na Figura 11 e Tabela 5, constatou-se que os valores de discrepância maior (-3,305 mm) e menor (-5,174 mm) foram identificados exatamente nos picos correspondentes aos anos de 2012 e 2016. A média anual de todas as discrepâncias foram negativas (-4,243 mm), mostrando que no geral houve uma queda nos valores da TNMM entre a ALTSAT e maregrafia,

Diante do exposto, as discrepâncias das TNMM entre as duas técnicas podem estar associadas às diferenças entre os referenciais de níveis do IBGE e DHN, pois eles não são compatíveis, sendo necessário realizar um transporte dos referenciais de níveis das distintas instituições. Além disso, notou-se na EMIMB que não houve uma comunicação por parte do IBGE em relação à troca de equipamentos e sensores, mudança de referenciais entre outros. Como resultado disso foi verificado no banco de dados da RMPPG na EMIMB muitos dados faltantes e a mudança do referencial altimétrico sem algum aviso prévio, induzindo efeitos sistemáticos no processamento das previsões de marés.

De forma geral as discrepâncias obtidas através das diferenças das TNMMs do EIGEN-6C4 e a média das TNMM nas duas técnicas, foi de aproximadamente 46,28cm, concluindo que as desigualdades entre os modelos geopotenciais ficaram na casa dos centímetros.

6 CONCLUSÃO

Um dos objetivos desta pesquisa foi realizar um estudo comparativo das variações locais da TNMM por meio da ALTSAT em relação a técnica de maregrafia nas estações de Fortaleza – CE (EMFOR), Salvador – BA (EMSAL) e Imbituba – SC (EMIMB), todas pertencentes à RMPPG do IBGE. Sendo assim, para alcançar o objetivo principal, foram estimadas as variações locais da TNMM em cada marégrafo com uma série temporal de 9 anos (2011-2019).

Em uma análise comparativa das variações locais da TNMM, verifica-se no geral que houve uma variação mais acentuada nos dados de maregrafia ao serem comparados com a ALTSAT, onde a EMFOR apresentou 0,005 m de amplitude para ALTSAT e 0,099 m para maregrafia, e a EMSAL, 0,009 m e 0,336 m para ALTSAT e maregrafia, respectivamente. Tal comportamento foi visível em todas as estações utilizadas neste estudo, porém a EMIMB apresentou comportamento contrário, com variações mensais e anuais mais elevadas na técnica de ALTSAT, em que sua amplitude foi de 0,019 m, enquanto na maregrafia foi de 0,002 m.

Diante do exposto, as possíveis causas para as discrepâncias entre as técnicas, são as seguintes

limitações: a influência da não correção dos movimentos efetivos da crosta, onde localizam-se os sensores dos marégrafos; a ausência de dados ALTSAT multimissões, e a não compatibilidade entre os MGGs e o modelo oficial das anomalias de altura, uma vez que, os modelos globais são fundamentados em uma série de parâmetros que envolvem gravimetria por satélites e dados terrestres globais, e as altitudes normais (REALT-2018) apesar de conter dados da solução EIGEN-6C4 e dados gravimétricos do continente sul americano, não apresentam informações gravimétricas na costa oceânica (SILVA; GUIMARÃES, 2018).

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se desenvolver um estudo semelhante envolvendo, dados geológicos, geofísicos, modelos geopotenciais de alta resolução e que apresentem dados gravimétricos consistentes para a área de estudo, além da aplicação das correções dos movimentos da crosta terrestre nas regiões dos marégrafos.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que disponibilizou seus equipamentos, instalações e aplicativos computacionais, além do apoio à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de Mestrado concedida ao primeiro autor.

Contribuição dos Autores

A autora Larissa Messias de Souza contribuiu na conceptualização, investigação, metodologia, recursos e redação. O autor Italo Ferreira Oliveira contribuiu na supervisão, metodologia, análise formal e redação.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ALBARICI, F. L. et al. Avaliação da Superfície Equipotencial de Referência Local (W_0SP) no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 542-555, 2021.
- ANDERSEN, O. B. et al. Improving the Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Combination of Tide Gauge and Satellite Altimetry Improving the Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Combination of Tide Gauge and Satellite Altimetry. **Marine Geodesy**, v. 0, n. 0, p. 1–29, 2018.
- ANTUNES, C.; GODINHO, J. M. Estudo da análise harmónica da maré aplicada ao marégrafo de Cascais. In: Actas da VII Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, p. 5-6, 2011.
- AVISO. **Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data**, 2020 Disponível em: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>. Acessado em: 09 nov. 2020.
- AVISO. **User handbook merged TOPOX/Poseidon products**, 1996. Disponível em: <http://www.altimetry.info/webs-documents/user-handbook-for-poseidon-product/>. Acessado em: 09 nov. 2020.
- CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. A.; JAMUR, K. P. Análise da estação maregráfica de Fortaleza para determinar as variações do nível do mar. In: **VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**, v. 7, 2018, Recife, Anais, p. 461-470.
- CHELTON, D. B. et al. Chapter 1: Satellite Altimetry. In: FU, L.-L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry, and Earth Sciences—A Handbook of Techniques and Applications**. San Diego: Academic Press, 2001. p. 1–131.

- COELHO, A. L. **Método de previsão de maré oceânica, utilizando análise harmônica em séries de 18,69 anos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil / Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2016.
- 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 em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI, Itajubá, MG, 2010.
- DA SILVA, L.M.; DE FREITAS, S.R.C. Análise de Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. **Revista Cartográfica**, v. 98, n. 5, p. 33-57, 2019, doi: <https://doi.org/10.35424/rcar.v5i98.140>.
- DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à Análise temporal do Datum Vertical Brasileiro**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- 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. 2, p.140-153, 2005.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS Desktop. **Geostatistical Analyst**. 2020. Disponível em: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/what-is-geostatistics-.htm>. Acessado em: 18 dez. 2020.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Satellite Radar Altimetry: past and future**. 2020. Disponível em: http://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/CryoSat. Acessado em: 13 abr. 2020.
- FERREIRA, Í. O.; SANTOS, G. R.; RODRIGUES, D. D. Estudo sobre a utilização adequada da Krigagem na representação computacional de superfícies batimétricas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 5, 2013.
- FRANCO, A S. **Tides: Fundamentals, Analysis and Prediction**. 2. ed. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), 1988.
- GODIN, G. **The analysis of tides**. Liverpool, University Press, 1972.
- GODÍNEZ, V. M. et al. Datos meteorológicos y de corrientes en el Alto Golfo de California: Experimento de invierno del 17 de enero al 2 de marzo del 2000. Informe Técnico CTOFT200011. **Comunicaciones Académicas. Serie Oceanografía Física**, CICESE, p. 53, 2000.
- HAYDEN, T. et al. Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE gravity field models. **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, p. 290-301, 2012.
- HEISKANEN, W.A.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. W. H. Freeman Company, São Francisco, p. 374, 1967.
- HUANG, J. Determining Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Methods. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 21, p. 11-125, 2017.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf. Acessado em: 10 ago. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estações maregráficas da RMPG - IBGE** - Download. Site. 2020. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/dados/. Acessado em: 10 ago. 2020.
- 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: 10.1016/j.asr.2020.01.009.
- KAYANO, M.T. et al. El Niño e La Niña dos Últimos 30 Anos: Diferentes Tipos. **Revista Climanálise - Edição Comemorativa de 30 anos**, p. 6, 2016.
- MAKANO, M.; YAMADA, S. On the mean sea levels at various locations along the coasts of Japan. **Journal**

- of the **Oceanographical Society of Japan**, v. 21, p.71–84, 1975.
- MORITZ, H. Advanced physical geodesy. **Bulletin Géodé- sique**, v. 54, n. 3, p. 395-407, 1980.
- 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.
- PALMEIRO, A. S. **Análise do vínculo do Datum Vertical Brasileiro a um Sistema Global de Altitudes com base em soluções fixadas e livres do PVCG**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2011.
- PEIXOTO, P. S. **Jason-1: Lendo os dados de altimetria por satélite para o nível do mar**. Instituto de Oceanografia da Universidade de São Paulo (USP). Trabalho de conclusão de curso de especialização em “medição, análise, previsão e modelagem do nível do mar, p. 1-40, 2007.
- PUGH, D. T. Tides. **Encyclopedia of Ocean Sciences**. Ed. STEELE, J. H.; THORPE, S. A.; TUREKIAN, K. K. Academic Press, San Diego p. 2961-2968, 2001.
- REIS, V. P., PALMEIRO, A. S., BARBOSA, L. G. Determinação da topografia do nível médio do mar com altimetria por satélites. **Revista Brasileira de Geomática**, v. v.6, n.2, p. 77–98, 2018b.
- 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. v.6, n.1, p. 3–22, 2018a.
- RIBEIRO, C. R. **Processos de alterações da maré astronômica na desembocadura da Lagoa dos Patos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2008.
- ROSMORDUC, V. et al. **Radar Altimetry Tutorial (BRAT)**, p. 357, 2016.
- SANTOS, M. C. Tendências modernas e questões relacionadas com a definição e realização de sistemas verticais: a experiência canadense. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, p. 1627-1639, 2015.
- SILVA, L. M. DA; FREITAS, S. R. C. DE; DALAZOANA, 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.
- SOUZA, L. M.; PALMEIRO, A. S. Análise da influência das correções geofísicas em dados de Altimetria por Satélite na região de Imbituba-SC. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 8, n. 4, p. 299 - 313, 2020.
- THOMPSON, K. R. An analysis of British monthly mean sea level. **Geophysical Journal International**, v. 63, n. 1, p. 57-73, 1980.
- THOMPSON, R. O.; Low-pass filters to suppress inertial and tidal frequencies. **Journal of Physical Oceanography**, v. 13, p. 1077-1083, 1983.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. Berlin: Walter de Gruyter, p. 416, 2001.
- VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. (Ed.). **Coastal altimetry**. Springer, p. 578, 2011.
- WOODWORTH, P. L. et al. Towards worldwide height system unification using ocean information. **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, p. 302–318, 2012, doi: 10.2478/v10156-012-0004-8

Biografia do autor principal



Larissa Messias de Souza, natural de Vitória, Espírito Santo, nascida em 1993. Engenheira Agrimensora e Cartógrafa formada pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ/ Seropédica), com mestrado em Informações Espaciais pela Universidade Federal de Viçosa (UFV/ Viçosa). Tem experiência em estudos na área de Altimetria por Satélites e Hidrografia. Atualmente é doutoranda em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (UFPR/ Curitiba).



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.