

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

TESE

**Estimativa da Qualidade da Altitude da Superfície
do Mar por Meio de Observações Oriundas do
Sentinel-6A**

Paulo Leoncio da Silva de Melo

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

**ESTIMATIVA DA QUALIDADE DA ALTITUDE DA SUPERFÍCIE DO
MAR POR MEIO DE OBSERVAÇÕES ORIUNDAS DO SENTINEL-6A**

PAULO LEONCIO DA SILVA DE MELO

Sob a Orientação da Professora

Paula Debiasi

e Coorientação da Professora

Alessandra Svonka Palmeiro

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, área de concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

Seropédica, RJ

Julho de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M528e Melo, Paulo Leoncio da Silva de , 1991 Estimativa da qualidade da altitude da superfície do mar por meio de observações oriundas do Sentinel-6A / Paulo Leoncio da Silva de Melo. - Seropédica, 2024. 59 f.

Orientadora: Paula Debiasi.
Coorientadora: Alessandra Svonka Palmeiro.
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, 2024.

1. Terra do Fogo. 2. Marégrafo de Arraial do Cabo. 3. Altimetria por satélites. I. Debiasi, Paula, 1982 , orient. II. Palmeiro, Alessandra Svonka, 1979-, coorient. III Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 21 / 2024 - PPGCTIA (12.28.01.84)

Nº do Protocolo: 23083.037092/2024-91

Seropédica-RJ, 26 de julho de 2024.

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM
AGROPECUÁRIA

PAULO LEONCIO DA SILVA DE MELO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, área de concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

TESE APROVADA EM 25/07/2024

Paula Debiasi. Dra., UFRJ

(Orientadora)

Daniele Barroca Marra Alves. Dra., UNESP

Heloísa Alves Silva Marques. Dra., IME

Luiz Guimarães Barbosa. Dr., UFRRJ

Regiane Dalazoana. Dra., UFPR

(Assinado digitalmente em 26/07/2024 19:47)

LUIZ GUIMARAES BARBOSA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.44)

(Assinado digitalmente em 31/07/2024 11:59)

PAULA DEBIASI
ASSINANTE EXTERNO

(Assinado digitalmente em 26/07/2024 13:10)

REGIANE DALAZOANA
ASSINANTE EXTERNO

(Assinado digitalmente em 29/07/2024 13:47)

HELOÍSA ALVES SILVA MARQUES
ASSINANTE EXTERNO

(Assinado digitalmente em 29/07/2024 08:40)

DANIELE BARROCA MARRA ALVES
ASSINANTE EXTERNO

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **21**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data de emissão: **26/07/2024** e o código de verificação: **5a71b6d22e**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho: a minha querida e amada mãe, Mirian, que sempre esteve ao meu lado independente do caminho. Aos meus irmãos, Pedro e Júnior, que sempre torceram por mim e acreditaram nos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela minha vida, saúde e perseverança. À minha mãe e meus irmãos que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos, alegres ou tristes. Aos meus parentes e amigos por sempre torcerem por mim e acreditarem na conclusão desta tese.

À CAPES, à UFRRJ, ao PPGCTIA, a EUMETSAT e ao Departamento de Engenharia, por permitirem, aceitarem e colaborarem, em todos os sentidos, para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

À minha orientadora Professora Dra. Paula Debiasi, que desde a graduação sempre esteve disposta a orientar-me pelo caminho da pesquisa, por mais que não tenha seguido a mesma área, nunca esquecerei dos ensinamentos e das broncas.

À minha coorientadora e amiga Professora Dra. Alessandra Svonka Palmeiro, que topou esse desafio e sempre esteve ao meu lado, aconselhando e escutando com paciência minhas eternas falas. Por sempre estar disposta a ouvir-me com um sorriso leve e um abraço sincero. Agradeço a paciência em muitos delírios científicos.

Às minhas amigas Professora Dra. Alessandra Carreiro Baptista e Professora Dra. Madelon Rodrigues Sá Braz pela paciência, conselhos, parceria e principalmente pela amizade, que foi muito importante durante esse período de doutoramento.

Aos colegas professores do Departamento de Engenharia, que permitiram a minha ausência em tempo parcial durante os quatro anos do curso.

As professoras Dra. Daniele Barroca Marra Alves, Dra. Heloísa Alves Silva Marques e Dra. Regiane Dalazoana e ao Professor Dr. Luiz Guimarães Barbosa, membros da banca, pelo tempo dedicado à leitura, às correções e às sugestões.

RESUMO

MELO, Paulo Leoncio da Silva de. **Estimativa da qualidade da altitude da superfície do mar por meio de observações oriundas do Sentinel-6A**. 2024. 59f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Uma forma de monitorar a variação do nível dos oceanos é a utilização da Altimetria por Satélites (ALTSAT), visto que, ela determina essa variação de forma remota, com cobertura global e resolução temporal, por meio de satélites altímetros. Outra solução para o monitoramento dessa variação, seria por meio de leituras maregráficas, entretanto, essas são apenas pontuais e locais, não servindo para estudos a nível global. Avaliar a variação da Altitude da Superfície do Mar (ASM) permite obter informações sobre o comportamento da superfície do oceano, que está em constante elevação. Essa elevação dos oceanos pode ocasionar a inundação de áreas urbanas e agrícolas, além de salinizar corpos hídricos utilizados para irrigação. O Sentinel-6A (S6A) foi lançado em 2020, com o objetivo de fornecer dados de ALTSAT precisos, consistentes e de fácil acesso. Dentro deste contexto, este trabalho teve como objetivo a determinação da qualidade dos valores de ASM obtidos pelas observações do S6A, comparando-os de forma absoluta e relativa com leituras maregráficas. Foi considerada uma região próxima ao marégrafo de Arraial do Cabo – RJ. As leituras maregráficas foram transformadas para ASM e essas altitudes oriundas dos sensores maregráficos (Radar e Encoder) foram denominadas de ASM-MAR. Para que haja uma comparação adequada entre as ASM obtidas por meio do S6A (ASM-S6A) e as ASM-MAR, foi necessário interpolar as ASM-MAR para o mesmo instante de tempo, ao qual, as ASM-S6A foram obtidas. Para isso, foi implementada uma rotina no *software* Octave em que foram determinados os coeficientes do polinômio de Hermite. Com os conjuntos de dados ASM-S6A e ASM-MAR, interpolados para o mesmo intervalo de tempo, as ASM-S6A foram extrapoladas para a posição do marégrafo. A Comparação Absoluta (CA) foi realizada entre o conjunto de ASM-S6A extrapoladas e o conjunto de ASM-MAR. A Comparação Relativa (CR), foi realizada entre as diferenças diárias das ASM-S6A e as diferenças diárias entre as ASM-MAR. A série temporal escolhida foi a que apresentou o maior Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP), menor média, desvio padrão e Erro Médio Quadrático (EMQ) e estava mais próxima do marégrafo. Para a definição da qualidade da ASM oriunda do S6A, a série escolhida foi a 260. Então, a qualidade da ASM oriunda do S6A foi de $\pm 0,0518$ metros. As médias de ASM-S6A e ASM-MAR (Radar) e ASM-MAR (Encoder) foram, respectivamente, -5,6374 metros; -5,6472 metros e -5,634 metros. Ou seja, não apresentaram diferenças significativas, pois se encontraram dentro do intervalo do desvio-padrão. Como o programa de pós-graduação possui uma parceria com a *Universidad Nacional de Rio Cuarto* (UNRC), determinou-se a ASM-S6A para a região da Terra do Fogo, na Argentina. Ao considerar todas as séries temporais (312 séries) que compreenderam os dias de passagem do S6A pela região de estudo (50 dias), a média de variação da ASM na região foi de 0,1296 metros, ou seja, 12,96 centímetros. Já o desvio padrão foi de $\pm 0,0113$ metros. Ao analisar a qualidade da ASM-S6A, por meio da comparação com as ASM-MAR, verificou-se que o Sentinel-6A possui uma precisão centimétrica.

Palavras-chave: Terra do Fogo. Marégrafo de Arraial do Cabo. Altimetria por satélites.

ABSTRACT

MELO, Paulo Leoncio da Silva de **Estimate of sea surface altitude quality through observations from Sentinel-6A**. 2024. 59p. Thesis (Doctorate in Science, Technology and Innovation in Agriculture). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

One way to monitor ocean level changes is through Satellite Altimetry (ALTSAT), as it measures this variation remotely, with global coverage and temporal resolution, using altimeter satellites. Another solution for monitoring this variation is through tide gauge readings; however, these are only point-specific and local, and do not serve global studies. Assessing Sea Surface Altitude (SSA) variation provides information on the behavior of the ocean surface, which is constantly rising. This rise in ocean levels can lead to the flooding of urban and agricultural areas, as well as salinizing water bodies used for irrigation. Sentinel-6A (S6A) was launched in 2020 with the goal of providing accurate, consistent, and easily accessible ALTSAT data. Within this context, the objective of this study was to determine the quality of the SSA values obtained from S6A observations, comparing them absolutely and relatively with tide gauge readings. A region near the tide gauge in Arraial do Cabo – RJ was considered. The tide gauge readings were transformed into SSA, and these altitudes from the tide gauge sensors (Radar and Encoder) were termed SSA-TG. For an adequate comparison between the SSA obtained via S6A (SSA-S6A) and SSA-TG, it was necessary to interpolate SSA-TG to match the time at which SSA-S6A was obtained. For this, a routine was implemented in Octave software to determine the Hermite polynomial coefficients. With the datasets of SSA-S6A and SSA-TG interpolated to the same time interval, SSA-S6A was extrapolated to the position of the tide gauge. Absolute Comparison (AC) was performed between the extrapolated SSA-S6A dataset and the SSA-TG dataset. Relative Comparison (RC) was performed between the daily differences of SSA-S6A and the daily differences between SSA-TG. The chosen time series was the one with the highest Pearson Correlation Coefficient (PCC), lowest mean, standard deviation, and Root Mean Squared Error (RMSE) and was closest to the tide gauge. For the definition of the quality of SSA from S6A, the chosen series was 260. Thus, the quality of SSA from S6A was ± 0.0518 meters. The means of SSA-S6A and SSA-TG (Radar) and SSA-TG (Encoder) were -5.6374 meters; -5.6472 meters; and -5.634 meters, respectively. That is, there were no significant differences as they were within the standard deviation range. Since the graduate program has a partnership with the Universidad Nacional de Rio Cuarto (UNRC), SSA-S6A was determined for the Tierra del Fuego region in Argentina. Considering all the time series (312 series) that encompassed the days of S6A's passage through the study area (50 days), the mean SSA variation in the region was 0.1296 meters, or 12.96 centimeters. The standard deviation was ± 0.0113 meters. When analyzing the quality of the ASM-S6A by comparing it with the ASM-MAR, it was found that the Sentinel-6A has centimeter-level accuracy.

Keywords: Tierra del Fuego. Tide gauge of Arraial do Cabo. Satellite altimetry.

RESUMEN EXPANDIDO

MELO, Paulo Leoncio da Silva de. **Estimación de la calidad de la altitud de la superficie del mar mediante observaciones del Sentinel-6A**. 2024. 59 h. Tesis (Doctorado em Ciencia, Tecnologia e Inovación en Agropecuaria). Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

1. Introducción

La elevación de la temperatura global puede causar diversos impactos, por ejemplo: el derretimiento de las capas polares y la expansión térmica de los océanos. Como resultado, los océanos están expandiendo su volumen y tamaño, es decir, hay un proceso de elevación del Nivel Medio Global del Mar (NMGM) (FREDERIKSE et al., 2020). Una de las formas de cuantificar esta expansión es mediante la estimación de la variación de un componente altimétrico, que puede ser la Altitud de la Superficie del Mar (ASM).

El monitoreo del NMGM es una preocupación constante de la Geodesia. Durante mucho tiempo, la forma clásica de definir el Nivel del Mar Local (NML), que se consideraba coincidente con el geoide, fue a través de largas series temporales de lecturas mareográficas. Estas largas series sirven de base para la definición clásica del Datum Vertical (DV), ya que los mareógrafos son considerados los equipos más precisos para obtener lecturas del NML (BARNETT, 1984; SÁNCHEZ et al., 2021).

La forma más común de monitorear las variaciones del NML es mediante el uso de mareógrafos. Sin embargo, estos equipos tienen ciertas limitaciones, por ejemplo: los altos costos de mantenimiento y construcción, el hecho de que las lecturas representan las variaciones del NML en un único punto y la susceptibilidad de los equipos que componen los mareógrafos a factores ambientales y humanos. Esto hace que las lecturas mareográficas no sean recomendadas para representar las variaciones del NMGM (NEREM et al., 2018; ZANCHETTIN et al., 2021; ZHENG et al., 2023).

La Altimetría por Satélites (ALTSAT) es una técnica de teledetección que comenzó en 1970, a través de la misión Skylab. La ALTSAT revolucionó el monitoreo de la expansión de los océanos y de las áreas costeras en las últimas décadas, ya que permitió determinar datos altimétricos globales vinculados a un elipsoide de revolución global, sin interferencia de las condiciones climáticas. Además, presentó una precisión del orden de centímetros (NEREM et al., 2018).

La Agencia Espacial Europea (European Space Agency – ESA) desarrolló una serie de misiones satelitales y las denominó Programa Sentinel. El objetivo era reemplazar las antiguas misiones de observación de la Tierra y garantizar la continuidad de los datos para investigaciones en curso sobre este tema, principalmente para satisfacer las necesidades del programa Copernicus (ESA, 2022a).

La misión Copernicus Sentinel-6 (S6A) Michael Freilich fue el resultado de los esfuerzos conjuntos de las instituciones Copernicus (Comisión Europea), ESA, la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) (DONLON et al., 2021; ESA, 2022c; ZHRAN, 2023).

El S6A promete ofrecer datos de altimetría de calidad, incluyendo mediciones precisas del nivel del mar e información sobre la topografía oceánica. Esto hace que la misión sea atractiva para la investigación y el monitoreo de los cambios en el nivel del mar. Su tecnología avanzada y su capacidad de recopilación de datos en alta resolución la convierten en una herramienta valiosa para comprender y abordar los desafíos relacionados con el aumento del nivel del mar y sus consecuencias a nivel global y en regiones donde no hay información mareográfica (ESA, 2022c).

El objetivo general de este trabajo fue determinar la calidad de los valores de ASM obtenidos a partir de las variables del S6A, comparándolos de forma absoluta y relativa con lecturas mareográficas.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron: a) identificar las variables altimétricas disponibles del S6A y seleccionar cuáles se utilizarán para el cálculo de ASM; b) determinar la precisión del Interpolador de Hermite al modelar las lecturas mareográficas para el mismo momento en que se generaron los footprints; c) analizar la calidad de las Altitudes de la Superficie del Mar (ASM) mediante la comparación absoluta y relativa entre los datos de mareografía y ALTSAT; y d) evaluar la variación temporal de la ASM para la región de Tierra del Fuego, en Argentina.

2. Metodología

Con el fin de determinar la calidad de la ASM derivada de las observaciones del S6A (series altimétricas), estas fueron comparadas con las lecturas mareográficas, transformadas en ASM. Estas series altimétricas se obtuvieron a través de un registro en el Portal de Observación de la Tierra, administrado por el EUMETSAT data store.

Las lecturas mareográficas, obtenidas a partir de la base de datos del IBGE, fueron transformadas a ASM, y estas altitudes provenientes de los sensores mareográficos (Radar y Encoder) fueron denominadas ASM-MAR. Para realizar una comparación adecuada entre las ASM obtenidas mediante el S6A (ASM-S6A) y las ASM-MAR, fue necesario interpolar las ASM-MAR para el mismo instante de tiempo en el que se obtuvieron las ASM-S6A. Para ello, se implementó una rutina en el software Octave en la que se determinaron los coeficientes del polinomio de Hermite. Con los conjuntos de datos ASM-S6A y ASM-MAR, interpolados para el mismo intervalo de tiempo, las ASM-S6A fueron extrapoladas a la posición del mareógrafo.

La Comparación Absoluta (CA) se realizó entre el conjunto de ASM-S6A extrapoladas y el conjunto de ASM-MAR. La Comparación Relativa (CR) se realizó entre las diferencias diarias de las ASM-S6A y las diferencias diarias entre las ASM-MAR. La serie temporal elegida fue la que presentó el mayor Coeficiente de Correlación de Pearson (CCP), menor media, desviación estándar y Error Cuadrático Medio (ECM), y que estaba más próxima del mareógrafo.

Dado que el programa de posgrado tiene una colaboración con la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), se determinó la ASM-S6A para la región de Tierra del Fuego, en Argentina.

Para la determinación de las ASM en la región de Tierra del Fuego, las variables del S6A se obtuvieron mediante un registro en el Portal de Observación de la Tierra, administrado por el EUMETSAT data store. Para la lectura de las observaciones del S6A y la selección de las variables se utiliza Panoply. Este software desarrollado por la NASA permite al usuario crear gráficos de datos en formatos como netCDF, HDF y GRIB, además de seleccionar las variables de interés. El cálculo de los valores de ASM y la definición de las series temporales se realizaron en una hoja de cálculo.

En la comparación relativa, las ASM-S6A se compararon entre sí, considerando cada serie temporal individualmente. Las series temporales se agruparon según la distancia del footprint al mareógrafo. Las series temporales contenían todas las ASM-S6A para las fechas en que el S6A recolectó las variables. Se obtuvieron las diferencias entre los valores de ASM-S6A para cada serie temporal. Con las diferencias calculadas, se obtuvieron la media y la desviación estándar para determinar la variación temporal de la ASM en la región

3. Resultado y Discusión

La forma del polinomio interpolador que mejor se ajusta a los valores de ASM-MAR fue determinada mediante el cálculo de los coeficientes a través de la resolución de la matriz de Vandermonde (Apéndice I). En algunos casos, esto resultó en un polinomio de Hermite de 1° grado, a diferencia de otras ecuaciones que presentaron polinomios de 2° grado. Esto no tiene una relación directa con las lecturas o con las variables del S6A; simplemente es la mejor forma que el interpolador encontró para modelar los datos.

Al realizar la validación del polinomio de Hermite generado tras la interpolación, los puntos de verificación fueron insertados en el polinomio y el resultado fue comparado con los valores registrados por los mareógrafos. El orden del error fue de aproximadamente -10^{15} . Con esto, la forma del polinomio elegida (polinomio completo de 2° grado) logró interpolar las ASM-MAR para los mismos instantes de tiempo de las ASM-S6A.

Para la definición de la calidad de la ASM proveniente del S6A, la serie elegida fue la 260. Así, la calidad de la ASM proveniente del S6A fue de $\pm 0,0518$ metros. Las medias de ASM-S6A y ASM-MAR (Radar) y ASM-MAR (Encoder) fueron, respectivamente, -5,6374 metros; -5,6472 metros y -5,634 metros. Es decir, no presentaron diferencias significativas, ya que se encontraron dentro del intervalo de la desviación estándar.

Al considerar todas las series temporales (312 series) que comprendieron los días de paso del S6A por la región de Tierra del Fuego (50 días), la media de variación de la ASM en la región fue de 0,1296 metros, es decir, 12,96 centímetros. La desviación estándar fue de $\pm 0,0113$ metros.

Giehl, Dalazoana y Santana (2022) compararon las observaciones altimétricas provenientes del satélite Sentinel-3A con datos mareográficos de las estaciones mareográficas de la RMPG. Agruparon las observaciones en celdas, considerando un radio de 100 km sobre el océano a partir de la ubicación de los mareógrafos. El intervalo de tiempo fue desde noviembre de 2017 hasta abril de 2020. En cada estación mareográfica, se eligió la celda altimétrica más cercana que obtuvo la mejor correlación con los datos mareográficos.

Los CCP de las celdas fueron iguales o superiores a 0,90 en todos los mareógrafos, destacándose las pequeñas distancias entre las celdas de altimetría elegidas y los mareógrafos en Arraial do Cabo, Salvador y Fortaleza, que presentaron valores de 5,37 km, 4,51 km y 4,62 km, respectivamente. Esto no ocurrió en este estudio, dado que la serie temporal elegida estaba, en promedio, a 25,0870 km de distancia del mareógrafo de Arraial do Cabo. Una de las explicaciones para esto puede ser que el Sentinel-6A recolecta algunas variables solo a cierta distancia de la costa, debido a la influencia de la baja profundidad y la costa en las relaciones entre la reflexión y absorción del señal del altímetro.

Considerando la celda elegida por los autores, para la misma región de este trabajo, la media de ASM proveniente del Sentinel-3A fue de $-5,59 \text{ m} \pm 0,27 \text{ m}$, entre 2017 y 2020. En este trabajo, la media de ASM proveniente del Sentinel-6A fue de $-5,6374 \text{ m} \pm 0,0518 \text{ m}$, para el intervalo entre 2020 y 2022. Considerando el mismo elipsoide de revolución adoptado y el signo negativo en los valores de ASM, indicando que la superficie del mar está por debajo del elipsoide, se nota que hubo una variación negativa de 0,05 m en la ASM para la región. Sin embargo, no se puede afirmar que el Nivel del Mar está aumentando o disminuyendo, ya que, considerando la desviación estándar, los valores pueden ser significativamente iguales.

Heinoja, Delpeche-Ellmann y Ellmann (2023) analizaron el desempeño de las misiones Sentinel-3A, Jason-3 y Sentinel-6A, con el objetivo de determinar la variación del nivel del mar y la precisión de cada misión en la región este del Mar Báltico. Los autores utilizaron observaciones de los satélites, datos de mareógrafos, modelos hidrodinámicos y un modelo geoidal de alta resolución. Los resultados indicaron que la precisión varió para la misión Jason-3 en un intervalo de 1,68 cm a 50,14 cm. Para la misión Sentinel-3A, la variación de la precisión fue de 2,8 cm a 46,27 cm. Y para la misión Sentinel-6A, la precisión varió de 3,5 cm a 43,90 cm. A pesar de las interferencias en los resultados debido a la influencia de la presencia de hielo marino en la región, el Sentinel-6A fue la misión que

presentó los mejores resultados. Al comparar la precisión calculada en este trabajo ($\pm 5,18$ cm) con la precisión que los autores alcanzaron con la misión Sentinel-6A, se observa que la precisión de este trabajo se encuentra dentro del intervalo calculado por los autores.

4. Consideraciones Finales

El Sentinel-6A cuenta con diversos equipos y sensores a bordo que sirven para recolectar datos sobre el área sobrevolada. Uno de los equipos es el altímetro denominado Poseidon-4, que es un radar de apertura sintética de alta resolución. Según la ESA (2022f), comparado con las misiones CryoSat y Sentinel-3, el S6A presenta una mayor precisión que estas misiones. Esto se puede comprobar al comparar los resultados encontrados por Giehl, Dalazoana y Santana (2022), donde la precisión de la media de ASM derivada del Sentinel-3 fue de $\pm 0,27$ m, con los resultados de esta investigación, donde la precisión de la media de ASM derivada del Sentinel-6A fue de $\pm 0,05$ m. Asimismo, en el estudio de Heinoja, Delpeche-Ellmann y Ellmann (2023), los resultados indicaron que la precisión varió para la misión Jason-3 en un intervalo de 1,68 cm a 50,14 cm. Para la misión Sentinel-3A, la variación de la precisión fue de 2,8 cm a 46,27 cm. Y para la misión Sentinel-6A, la precisión varió de 3,5 cm a 43,90 cm.

Los coeficientes del Polinomio Interpolador de Hermite fueron calculados mediante un script en el software Octave. La idea central de este script fue, en primer lugar, construir una ley de formación que modele los datos y verifique los errores cometidos. Esta modelación se realizó considerando un sistema de ecuaciones lineales. Al obtener la ley de formación, esta aún no fue considerada un Polinomio Interpolador de Hermite. La matriz de Vandermonde fue utilizada para encontrar los coeficientes del Polinomio Interpolador de Hermite.

Al realizar la validación del polinomio de Hermite generado tras la interpolación, los puntos de verificación fueron insertados en el polinomio y el resultado fue comparado con los valores registrados por los mareógrafos. El orden del error fue de aproximadamente -10^{-5} . Con esto, la forma del polinomio elegida (polinomio completo de 2° grado) logró interpolar las ASM-MAR para los mismos instantes de tiempo de las ASM-S6A.

Las comparaciones absoluta y relativa se realizaron con el fin de obtener la calidad de las ASM entre los datos de la mareografía y de la ALTSAT. Para la definición de la serie temporal del S6A que más se aproximó al estado del mar registrado por el mareógrafo de Arraial do Cabo, se utilizaron criterios de selección como: la menor media, el menor desvío estándar, el mayor CCP, el menor EMQ y la distancia del footprint hasta el mareógrafo. Algunos criterios tuvieron series diferentes que los atendieron, pero la serie elegida fue la que estaba más próxima del mareógrafo en comparación con las otras series que cumplieron los criterios de selección. La celda elegida fue la 260, a 22,0966 km del mareógrafo seleccionado. Así, la calidad de la ASM obtenida por los datos del S6A fue de $\pm 0,0518$ metros. El valor medio de la ASM-S6A fue de -5,6374 metros. Al comparar con las ASM-MAR (Radar) y ASM-MAR (Encoder), se verificó que no hubo diferencias significativas, ya que se encontraron dentro del intervalo de precisión.

Para la región de Tierra del Fuego, se consideró una distancia de la costa de hasta 100 km. Tras el cálculo de la variación diaria de las ASM-S6A, se procedió al cálculo de la media y del desvío estándar para determinar la variación y la precisión para el período comprendido entre el 26 de diciembre de 2020 y el 26 de abril de 2022. La media de variación de la ASM en la región fue de 0,1296 metros, es decir, 12,96 centímetros. La desviación estándar fue de $\pm 0,0113$ metros.

Al analizar la calidad de la ASM-S6A mediante la comparación con las ASM-MAR, provenientes de las lecturas mareográficas de los sensores Radar y Encoder, se verificó que el Sentinel-6A posee una precisión centimétrica. Además, al analizar la variación de las ASM-S6A para la región de Tierra del Fuego, Argentina, se constató que, para el intervalo de 486 días, esta variación también fue centimétrica.

Para trabajos futuros, se recomienda analizar la línea de procesamiento del S6A – F08 y compararla con los datos del S6A – F06, esta última adoptada en este trabajo. También se sugiere elaborar una rutina para ayudar en los cálculos. Asimismo, se recomienda realizar este análisis para otros mareógrafos y, en particular, para aquellos que sufren la influencia de ríos, como por ejemplo, el mareógrafo de Santana – Amapá. Además, se sugiere utilizar otros tipos de mareógrafos para la validación, como los mareógrafos de boya.

Palabras clave: Tierra del Fuego. Mareógrafo del Arraial do Cabo. Altimetría por Satélites.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Produtos disponibilizados pela EUMETSAT e formas de distribuição	13
Tabela 2:	Médias anuais em Imbituba entre 1949 e 1957	20
Tabela 3:	Interpretação do valor da correlação de Pearson	23
Tabela 4:	Valores das distâncias das séries temporais (1 à 5 e 308 à 312) até o marégrafo de Arraial do Cabo	39
Tabela 5:	Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação absoluta (sensor Radar mareográfico)	41
Tabela 6:	Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação absoluta (sensor Encoder mareográfico)	42
Tabela 7:	Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação relativa (sensor Radar mareográfico)	42
Tabela 8:	Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação relativa (Encoder mareográfico)	43
Tabela 9:	Valores de EMQ.....	44
Tabela 10:	Valores das ASM das séries temporais (1 à 5 e 308 à 312) na região da Terra do Fogo.....	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Representação do <i>footprint</i> e da trilha	6
Figura 2:	Altitude da superfície do mar	7
Figura 3:	Período de disponibilização de dados das principais missões altimétricas oceânicas	8
Figura 4:	Representação do <i>geoide</i>	14
Figura 5:	Representação da elipse	15
Figura 6:	Superfícies geodésicas de referência	17
Figura 7:	Cartograma das estações da RMPG com a rede altimétrica do SGB	22
Figura 8:	Diagramas de dispersão relacionados com o valor de R	24
Figura 9:	Mapa de localização das estações maregráficas consideradas	26
Figura 10:	<i>Data services</i> da EUMETSAT	27
Figura 11:	Fluxograma	28
Figura 12:	Correlação entre os níveis de referência maregráfica e algumas variáveis relacionadas à altimetria por satélite	33
Figura 13:	Mapa de localização da área de estudos e dos <i>footprints</i>	36
Figura 14:	Representação da trilha utilizada no <i>software Panoply</i>	36
Figura 15:	Fluxograma	37
Figura 16:	Gráfico dos valores da média das diferenças entre ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo	40
Figura 17:	Gráfico dos valores do desvio-padrão das diferenças entre ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo	40
Figura 18:	Gráfico dos valores do coeficiente de correlação de Pearson entre as ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo	41
Figura 19:	Gráfico da comparação absoluta entre as ASM-S6A e ASM-MAR, considerando apenas as séries temporais escolhidas	43

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ALTSAT	Altimetria por Satélites
AMR-C	<i>Advanced Microwave Radiometer for Climate</i>
ASM	Altitude da Superfície do Mar
ASM-MAR	Altitude da Superfície do Mar - Maregráfica
ASM-S6A	Altitude da Superfície do Mar - Altimétrica
ASMA	<i>Sea Surface Height Anomaly</i>
AT	Atmosfera Terrestre
AVISO	<i>Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data</i>
BDG	Banco de Dados Geodésicos
CA	Comparação Absoluta
CHIME	<i>Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment</i>
CNES	<i>Centre National d'Études Spatiales</i>
CIMR	<i>Copernicus Imaging Microwave Radiometer</i>
CO2M	<i>Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring</i>
CR	Comparação Relativa
CRISTAL	<i>Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter</i>
CCP	Coefficiente de Correlação de Pearson
CSA	<i>Canadian Space Agency</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite</i>
DV	Datum Vertical
DGFI	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
EMMAC	Estação Maregráfica de Macaé
EMARC	Estação Maregráfica de Arraial do Cabo
ESA	<i>European Space Agency</i>
EUMETSAT	<i>European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GGOS	<i>Global Geodetic Observing System</i>
GGRS	<i>Global Geodetic Reference System for Sustainable Development</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICGEM	<i>International Center for Global Gravity Field Models</i>
ICRF	<i>International Celestial Reference Frame</i>
ICRS	<i>International Celestial Reference System</i>
IGM	Instituto Geográfico Militar
IGN	Instituto Geográfico Nacional
ITGRF	<i>International Terrestrial Gravity Reference Frame</i>
ITGRS	<i>International Terrestrial Gravity Reference System</i>
IHRF	<i>International Height Reference Frame</i>
IHRS	<i>International Height Reference System</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
ITRS	<i>International Terrestrial Reference System</i>
LLR	<i>Lunar Laser Ranging</i>

LSTM	<i>Copernicus Land Surface Temperature Monitoring</i>
MDT	<i>Mean Dynamic Topography</i>
MGG	Modelos Globais do Geopotencial
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NMGM	Nível Médio Global do Mar
NML	Nível do Mar Local
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRT	<i>Near-Real Time</i>
NTC	<i>Non Time Critical</i>
OpenADB	<i>Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut</i>
POD	<i>Precise Orbit Determination</i>
PVCG	Problema de Valor de Contorno da Geodésia
PSMSL	<i>Permanent Service for Mean Sea Level</i>
ROSE-L	<i>Copernicus Radar Observation System for Europe in L-band</i>
RMPG	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia
RN	Referência de Nível
RRNN	Referências de Nível
S6A	Sentinel-6A
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGR	Sistemas Geodésicos de Referência
SIRGAS	Sistema de Referência Geodésico para as Américas
SLA	Sea Level Anomaly
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SSH	<i>Sea Surface Height</i>
Skylab	<i>Sky Laboratory</i>
STC	<i>Short Time Critical</i>
SWH	<i>Significant Wave Height</i>
SWOT	<i>Surface Water and Ocean Topography</i>
TNMM	Topografia do Nível Médio do Mar
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UKSA	<i>United Kingdom Space Agency</i>
UTC	<i>Universal Time Coordinate</i>
WGS84	<i>World Geodetic System 1984</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 Altimetria por Satélites	5
2.1.1 Aspectos gerais da altimetria por satélites (ALTSAT)	5
2.1.2 As missões Sentinel	9
2.1.3 Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich	10
2.2 Sistema Vertical	13
2.2.1 Superfícies geodésicas de referência	13
2.2.2 Sistema de altitudes	17
2.2.3 Sistemas geodésicos de referência (SGRs)	18
2.2.4 Rede altimétrica da Argentina	19
2.2.5 Datum vertical	20
2.2.6 Marégrafo	21
2.2.7 Rede maregráfica permanente para geodésia	21
2.3 Métodos Complementares para Avaliação de Dados do Sentinel-6A	23
2.3.1 Coeficiente de correlação de Pearson	23
2.3.2 Interpolador de Hermite	24
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	26
3.1 Delimitação da Área de Estudo para Leituras Maregráficas	26
3.2 Variáveis do S6A e Leituras Maregráficas	27
3.3 Etapas da Coleta e Processamento de Dados	28
3.3.1 Seleção das variáveis	29
3.3.2 Cálculo da distância entre os footprints e o marégrafo	29
3.3.3 Conversão do horário dos dados do Sentinel-6A	30
3.3.4 Cálculo de ASM oriunda das variáveis do Sentinel-6A	30
3.3.5 Extrapolação dos dados ASM Sentinel-6A	31
3.3.6 Obtenção das leituras maregráficas	31
3.3.7 Correspondência temporal	32
3.3.8 Cálculo das ASM maregráficas	32
3.3.9 Comparação absoluta	33
3.3.10 Comparação relativa	34
3.3.11 Cálculo da precisão das ASM-S6A	35
3.4 Determinação da Altitude da Superfície do Mar por Meio de Observações do Sentinel-6A na Região da Terra do Fogo – Argentina	35
3.4.1 Delimitação da área de estudo	35
3.4.2 Determinação das ASM	37
3.4.3 Etapas da coleta e processamento de dados	37
3.4.4 Obtenção dos dados do Sentinel-6A	37
3.4.5 Seleção das variáveis	37
3.4.6 Cálculo da distância entre os footprints e a costa	38
3.4.7 Cálculo de ASM oriunda das variáveis do Sentinel-6A	38
3.4.8 Comparação relativa	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 Resultados para a Região de Arraial do Cabo – Brasil	39
4.2 Resultados para a Região da Terra do Fogo – Argentina	44
4.3 Discussão	45

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7 APÊNDICE	58
SCRIPT PARA A INTERPOLAÇÃO DE HERMITE NO SOFTWARE OCTAVE, VERSÃO 9.1.0	58

1 INTRODUÇÃO

O sistema climático da Terra é interligado a atmosfera, a superfície terrestre, as superfícies glaciares, as superfícies hídricas e aos seres vivos. Portanto, é um sistema complexo e dinâmico. Esse sistema pode variar conforme o tempo. Além de, ser impulsionado por fenômenos naturais, por exemplo: mudanças orbitais da Terra, variações solares, erupções vulcânicas, terremotos e correntes oceânicas globais (VENEGAS; ACEVEDO; TREML, 2023).

A Atmosfera Terrestre (AT) possui em sua composição, substâncias (Gases do Efeito Estufa - GEE) capazes de absorver parte da radiação solar refletida pela superfície da Terra. Os GEE controlam o sistema climático da Terra e a quantidade desses gases na AT é regulada de forma natural. Mas, devido as ações antrópicas, por exemplo: as atividades industriais, a queima de combustíveis fósseis, agricultura, entre outras formas, a concentração dos GEE aumenta de forma descontrolada (GRUBER et al., 2019; FREDERIKSE et al., 2020; VENEGAS; ACEVEDO; TREML, 2023).

Uma das consequências do aumento descontrolado na quantidade de GEE é a elevação do calor na AT. Essa elevação do calor na AT gera um aumento na temperatura global. Esse aumento é denominado de aquecimento global (ALLEY et al., 2007).

A elevação da temperatura global pode causar diversos impactos, por exemplo: o derretimento das calotas polares e a expansão térmica dos oceanos. Com isso, os oceanos estão expandindo em volume e tamanho, ou seja, há um processo de elevação do Nível Médio Global do Mar (NMGM) (FREDERIKSE et al., 2020). Uma das formas de quantificar essa expansão é a utilização da estimativa da variação de uma componente altimétrica, que pode ser a Altitude da Superfície do Mar (ASM).

Segundo Dangendorf et al. (2019), essa elevação do NMGM ocorre em todo o planeta, mas a magnitude dela acontece de forma heterogênea. Essa magnitude da elevação ocorre com mais intensidade em regiões da costa africana, pequenas ilhas no atlântico e pacífico e na costa asiática, mais precisamente na região que compreende a Índia e as Filipinas (MEYSSIGNAC et al., 2023).

Ao longo do século XX, o NMGM aumentou aproximadamente 1,5 milímetro por ano, variando por causa de grandes flutuações que ocorreram em algumas décadas (HAY et al., 2015; DANGENDORF et al., 2019; FREDERIKSE et al., 2020). A partir do momento em que se constatou a ocorrência do aumento do NMGM de forma acelerada e não cíclica, tornou-se necessária a realização do monitoramento dessas expansões dos oceanos (NICHOLLS E CAZENAVE, 2010).

O monitoramento do NMGM é uma preocupação constante da Geodésia. Por muito tempo, a forma clássica para a definição do Nível do Mar Local (NML), que era considerado coincidente ao geoide, foi por meio de longas séries temporais de leituras maregráficas. Essas longas séries servem de base para a definição clássica do Datum Vertical (DV), pois os marégrafos são considerados os equipamentos mais precisos para obter leituras do NML (BARNETT, 1984; SÁNCHEZ et al., 2021).

As leituras maregráficas do NML registram as variações locais do nível do mar. Isso pode ser relevante para certas situações, como: a) a distribuição dos marégrafos na Terra é limitada a determinados pontos na costa. Isso impede a conclusão acerca da tendência global da variação do NMGM e b) pelo seu caráter local, o DV definido para um país não serve para

todos os outros países, o que gera um problema em levantamentos altimétricos em regiões de fronteira (SÁNCHEZ & SIDERS, 2017; ÍZ, 2023).

A forma mais comum de monitoramento das variações do NML é a utilização dos marégrafos. Mas, estes equipamentos possuem certas limitações, por exemplo: os altos custos de manutenção e de construção, o fato de as leituras representarem as variações do NML em ponto único e a suscetibilidade dos equipamentos, que compõem os marégrafos, a fatores ambientais e humanos. Isso torna as leituras maregráficas não recomendadas para representar as variações do NMGM (NEREM et al., 2018; ZANCHETTIN et al., 2021; ZHENG et al., 2023).

A Altimetria por Satélites (ALTSAT) é uma técnica de sensoriamento remoto que teve início em 1970, através da missão Skylab (do inglês - *Sky Laboratory*). A ALTSAT revolucionou o monitoramento da expansão dos oceanos e de áreas costeiras ao longo das últimas décadas. Pois, ela permitiu determinar dados altimétricos globais vinculados a um elipsoide de revolução global, sem interferência das condições climáticas. Ainda, apresentaram uma precisão na ordem centimétrica (NEREM et al., 2018).

Há diversos estudos na literatura sobre a avaliação desses dados altimétricos e fenômenos oceânicos, alguns dos mais recentes são: Zhou et al. (2023), que avaliaram os dados das missões: *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT), Sentinel-6 e da série Jason, através de um conjunto de boias equipadas com um sistema de posicionamento por meio do *Global Navigation Satellite System* (GNSS), capaz de determinar com precisão a ASM. Magalhaes et al. (2023), compararam os dados das missões Sentinel-6 e Jason-3, ou seja, uma altimetria com Radar de Abertura Sintética (do inglês, *Synthetic Aperture Radar* – SAR) e outra altimetria convencional, respectivamente.

A ALTSAT aplicada ao monitoramento do nível do mar permite determinar algumas grandezas que são importantes para tal estudo. Essas grandezas são denominadas de Altitude da Superfície do Mar e anomalia do nível do mar (do inglês, *Sea Level Anomaly* - SLA). A ASM é a relação entre a superfície do mar e o elipsoide de revolução adotado e a SLA é a diferença entre a ASM instantânea com relação a uma superfície média. Os valores de ASM e SLA, determinados pela ALTSAT são disponibilizados por meio de bancos de dados como o *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut* (DGFI) e da *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data* (AVISO) (DALAZOANA, 2005; GIEHL, 2020; GIEHL & DALAZOANA, 2022).

A agência espacial europeia (*European Space Agency* – ESA) desenvolveu uma série de missões de satélites e denominou-as de Programa Sentinel. O objetivo era substituir as antigas missões de observação da Terra e garantir a continuidade de dados para pesquisas em andamento sobre esse tema, principalmente para suprir as necessidades do programa Copernicus (ESA, 2022a).

A missão Copernicus Sentinel-6 (S6A) Michael Freilich foi resultado dos esforços conjuntos das instituições Copernicus (Comissão Europeia), ESA, Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (do inglês, *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* - EUMETSAT), Administração Nacional Aeronáutica e Espacial (do inglês, *National Aeronautics and Space Administration* - NASA e Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA) (DONLON et al., 2021; ESA, 2022c; ZHRAN, 2023).

Segundo Donlon et. al (2021), a missão S6A possui a mesma órbita que as missões TOPEX/Poseidon (T/P) e Jason. O objetivo de manter a órbita de missões anteriores foi de garantir a estabilidade a longo prazo do registro do nível do mar a partir do espaço e das medições de ASM e SLA. Além de possuir altímetros capazes de fornecer medições

compatíveis com outros sistemas, são eles: os de alta inclinação de órbita (CryoSat-2) e os de órbita polar (Sentinel-3).

O satélite S6A possui um altímetro denominado de Poseidon-4. Esse equipamento opera com duas frequências (C e Ku), com apontamento para o nadir (DONLON et al., 2021; ZHRAN, 2023). A ASM fornecida por esse altímetro foi obtida considerando o elipsoide de referência *World Geodetic System 1984* (WGS84). A ASM foi calculada pela diferença entre o alcance do altímetro (*range*), corrigido dos efeitos atmosféricos e do estado do mar, e a altitude do satélite (ESA, 2022f; ZHRAN, 2023).

Alguns trabalhos realizados considerando os dados oriundos da missão Copernicus Sentinel-6A (S6A) podem ser destacados, como por exemplo: Maiwald et al. (2020) que avaliaram o desempenho dos instrumentos AMR-CA e AMR-CB para correções efetivas nas observações altimétricas do Poseidon-4. Passaro et al. (2023) realizaram uma análise comparativa do desempenho costeiro dos altímetros Sentinel-6 e Jason-3, considerando seus diferentes modos de processamento. Dinardo et al., (2023) avaliaram as principais variáveis geofísicas altimétricas sobre a superfície do mar (anomalia da altura da superfície do mar, altura significativa das ondas, zero sigma e velocidade do vento) com dados altimétricos em alto mar considerando o modo de baixa resolução (LRM).

Neste trabalho foi determinada a qualidade dos valores de ASM obtidas por meio das variáveis do S6A (ASM-S6A). As ASM-S6A foram comparadas de forma absoluta com as ASM oriundas de leituras maregráficas (ASM-MAR), essas transformadas do zero da régua maregráfica para o elipsoide de revolução. Também, as diferenças de ASM, entre os dias de coleta de dados, foram comparadas com as diferenças entre as leituras maregráficas correspondentes aos mesmos dias selecionados para as ASM altimétricas, essa comparação foi denominada de relativa.

A avaliação do nível do mar em regiões de costa está em crescente relevância, devido as mudanças climáticas globais que ameaçam a vida na Terra. Embora a ALTSAT esteja voltada para estudar o comportamento da variação do nível do mar nos oceanos, nas regiões de costa, os dados altimétricos sofrem com a influência da baixa profundidade das águas e as propriedades refletivas do solo. Não obstante, melhorias notáveis nos algoritmos de processamento de dados de altímetros SAR ao longo da última década tenham sido implementadas, a capacidade computacional ainda não atinge a velocidade necessária para suportar o processamento em tempo real das variáveis e dados altimétricos (ZHENG et al., 2023).

O S6A promete oferecer dados de altimetria de qualidade, incluindo medições precisas do nível do mar e informações sobre a topografia oceânica. Isso, torna a missão atrativa para a pesquisa e monitoramento das mudanças no nível do mar. Sua tecnologia avançada e sua capacidade de coleta de dados em alta resolução transforma-o em uma ferramenta valiosa para compreender e abordar desafios relacionados ao aumento do nível do mar e suas consequências a nível global e em regiões onde não há informações maregráficas (ESA, 2022c).

A região de estudo foi escolhida baseada na localização do marégrafo. Ele deve estar posicionado na costa, pois, se instalado em rio, foz ou qualquer outro corpo hídrico, pode haver indisponibilidade total de dados oriundos da altimetria por satélites. A série temporal em que S6A teve suas variáveis processadas foi selecionada e o intervalo de tempo disponível para a faixa de processamento escolhida foi de 26 de dezembro de 2020 até 26 de abril de 2022.

O objetivo geral deste trabalho foi determinar a qualidade dos valores de ASM obtidos pelas variáveis do S6A, comparando-os de forma absoluta e relativa com leituras maregráficas.

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) identificar as variáveis altimétricas disponíveis pelo S6A e selecionar quais serão utilizadas para o cálculo de ASM;
- b) determinar a precisão do Interpolador de Hermite, ao modelar as leituras maregráficas para o mesmo horário em que os *footprints* foram gerados;
- c) analisar a qualidade das Altitudes da Superfície do Mar (ASM) pela comparação absoluta e relativa entre os dados da maregrafia e ALTSAT e;
- d) avaliar a variação temporal da ASM para a região da Terra do Fogo, na Argentina.

A justificativa para a realização dessa tese baseou-se nos seguintes argumentos: as regiões costeiras serão as primeiras a sofrerem com a expansão dos oceanos. Os desafios para as populações que residem nessas regiões são significativos, isso inclui, inundações, tempestades e erosão costeira. Por essa razão, é de extrema importância monitorar as alterações nos níveis do mar, nessas regiões, e compreender os impactos associados a essas mudanças.

Os marégrafos são equipamentos com alto custo de manutenção e as suas leituras estão sujeitas a: fatores ambientais, fatores humanos e aos movimentos verticais da crosta, o que pode afetar as estimativas de elevação do nível do mar. O que torna o uso desses equipamentos inadequado, para uma visão em escala global do aumento do nível do mar. Também, pela característica do fenômeno de ter sua magnitude variando conforme a região do globo terrestre.

A ALTSAT apresenta dados altimétricos regulares e abrangentes da superfície do mar e funciona sob diversas condições climáticas. Nas últimas décadas, o uso da ALTSAT para monitorar os oceanos e as áreas costeiras em todo o mundo revolucionou a forma que esse monitoramento é realizado. Como a missão S6A se compromete a fornecer dados de altimetria com qualidade, abrangendo medidas precisas do nível do mar e informações sobre a topografia dos oceanos, faz-se necessário avaliar essa qualidade nos dados de Altitude da Superfície do Mar.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Altimetria por Satélites

2.1.1 Aspectos gerais da altimetria por satélites (ALTSAT)

A Altimetria por Satélites (ALTSAT) é uma técnica de sensoriamento remoto em que é possível a realização de observações entre um sensor (altímetro) a bordo de um satélite e a superfície do oceano, gelo ou grandes corpos d'água que se encontram na Terra. Algumas variáveis derivadas dessa técnica estão relacionadas a uma superfície geodésica de representação da Terra, geralmente um elipsoide de referência global. Ainda, apresentam uma precisão na ordem centimétrica (PLAG & PEARLMAN, 2009).

O principal objetivo da ALTSAT é obter a distância entre o altímetro e a superfície do oceano. Essa distância é denominada de *range* (a). O sensor a bordo do satélite altimétrico transmite um pulso de radiação eletromagnética em direção ao oceano. O sinal chega até a superfície oceânica, parte é absorvido pela água e parte é disperso para diversas direções. A água apresenta uma alta refletividade na faixa de frequência de micro-ondas, entre 2 e 18 GHz e, por isso, essas faixas são as mais adequadas para a altimetria por satélite (BENVENISTE, 2011).

O sinal refletido pela superfície do mar ou oceano para o altímetro, pode ser contaminado por alguns ruídos, quando o satélite se aproxima de regiões de costa. Isso porque esses ruídos podem ser derivados do estado da superfície do mar, que tende a ser mais rugosa nesta região do que em mar aberto. Há ainda a probabilidade desses ruídos serem contaminados pela superfície terrestre, pois ela reflete os pulsos de radiação eletromagnética de forma especular (DALAZOANA, 2005).

Essa reflexão do sinal em direção ao satélite altimétrico é realizada em um intervalo de tempo. Conhecendo a velocidade da luz e esse intervalo de tempo é possível determinar a distância entre a superfície oceânica e o satélite. A Equação 1 apresenta essa formulação matemática (CHELTON et al., 2001; SEEBER, 2003; GIEHL, 2020):

$$a = \left(c * \frac{\Delta t}{2} \right) - \sum_j^n \Delta R_j \quad (1)$$

Em que: a é o *range*; c é o valor da velocidade da luz no vácuo; Δt é o intervalo de tempo que o pulso percorre do satélite para a superfície e da superfície para o satélite; e ΔR_j é o conjunto de correções.

As correções envolvidas na determinação do valor de *range* são (GIEHL & DALAZOANA, 2022):

a) correções de marés, que servem para evitar que as variações produzidas pelas marés afetem as análises relacionadas com a variação temporal do nível do mar¹;

¹ **Nível do mar:** Distância vertical entre a lâmina d'água do mar com relação ao zero da régua que compõe o marégrafo. Também denominado de nível instantâneo do mar.

- b) correções do estado do mar, considera a diferença entre a parcela da superfície que reflete o sinal emitido pelo satélite e a superfície média na região onde o feixe incide dada a característica ondulada da superfície oceânica;
- c) correções de propagação de sinal, visto que a propagação do pulso é afetada pela presença de vapor d'água, gases secos e elétrons livres na atmosfera, essas componentes retardam o tempo de percurso do sinal; e
- d) correções em função da resposta do oceano à dinâmica atmosférica, uma vez que a superfície do mar atua como uma membrana sensível às variações de pressão atmosférica.

Todos os satélites altimétricos possuem um campo de visão ou pegada (*footprint*) que é abrangido pela largura do feixe de micro-ondas incidente sobre a superfície do mar. Com isso, a distância entre o altímetro e o nível do mar é obtida pela média de todas as elevações determinadas dentro do *footprint* (PLAG & PEARLMAN, 2009). Ou seja, a medida do radar não é uma medida pontual. A Figura 1 ilustra o *footprint*, que é representado pela elipse branca (base do cone) sobre a representação da superfície terrestre e a faixa branca representa a trilha.

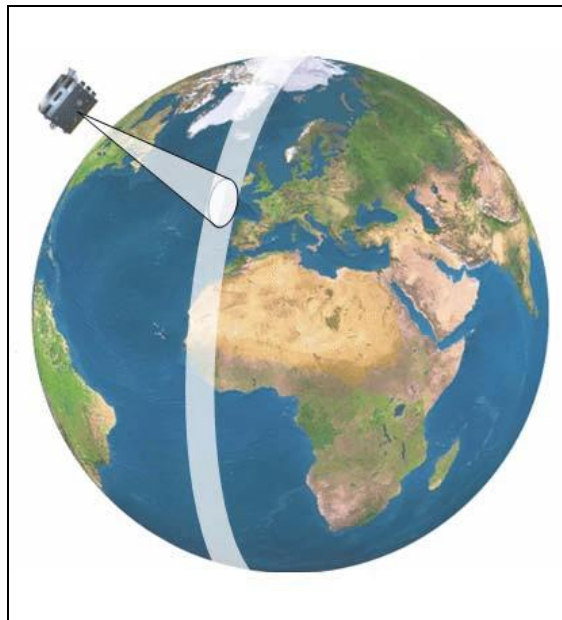


Figura 1: Representação do *footprint* e da trilha.

Fonte: Adaptado de Delovski, Bredemeyer e Werner (2016).

Segundo Benveniste (2011), os sinais refletidos da ALTSAT não servem apenas para determinar o valor do *range*. Outras componentes podem ser determinadas por meio do pulso refletido da superfície dos oceanos, são eles: a rugosidade, a altura das ondas e a velocidade do vento sobre a superfície oceânica.

A ALTSAT aplicada ao monitoramento do nível do mar permite determinar algumas grandezas que são importantes para tal estudo. Essas grandezas são denominadas de: Altitude da Superfície do Mar (ASM), ou ainda, do inglês *Sea Surface Height* (SSH) e Anomalia do Nível do Mar (*Sea Level Anomaly* - SLA). A Equação 2 mostra como é realizado o cálculo da ASM e a Equação 3 mostra como é realizado o cálculo da SLA. A Figura 2 ilustra essas componentes e suas relações.

$$ASM = h - a \quad (2)$$

$$SLA = NMM - ASM \quad (3)$$

Em que: h é a altitude elipsoidal do satélite e a é o *range* do satélite.

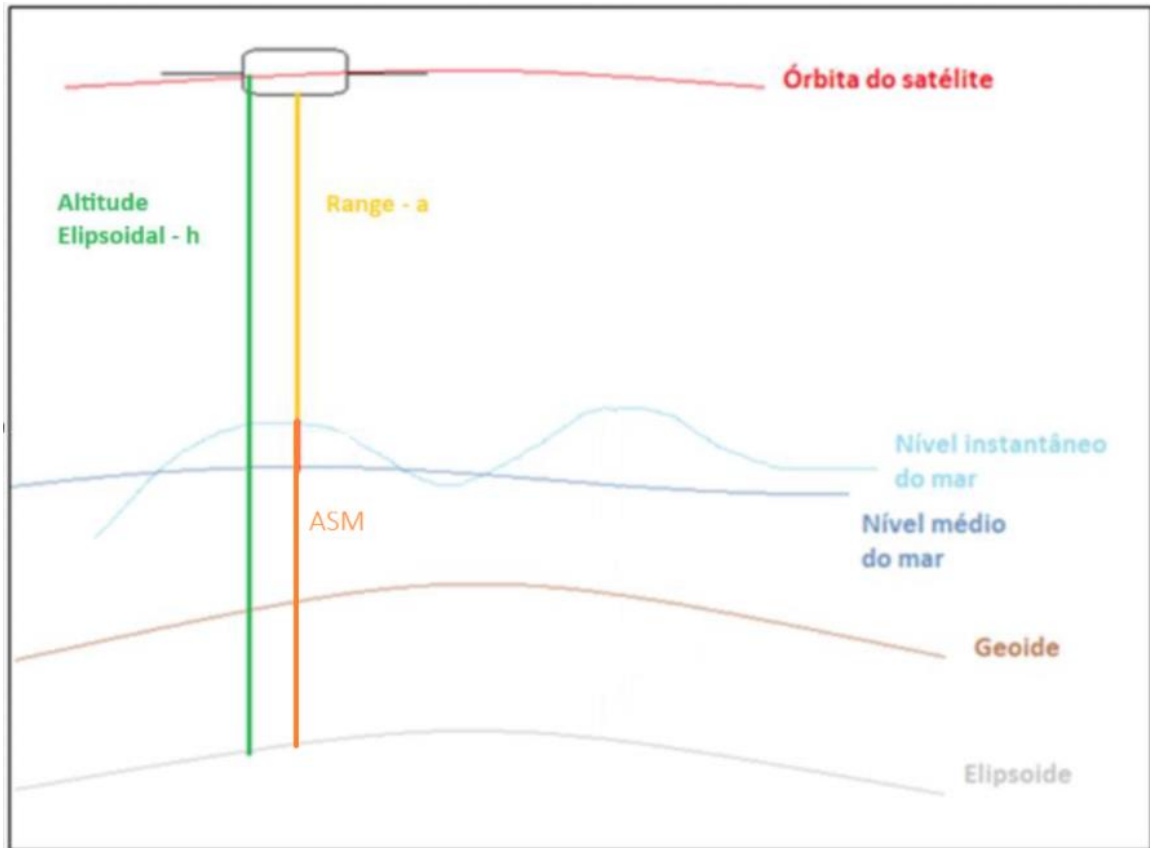


Figura 2: Altitude da superfície do mar.

Fonte: Adaptado de Giehl e Dalazoana (2022).

O monitoramento dessas componentes altimétricas (ASM e SLA) teve início em 1970, através da missão Skylab (*Sky Laboratory*, 1973-1974). E desde então, existem séries temporais de valores de ASM e SLA, que são disponibilizadas por meio de bancos de dados como o do *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut – Open Altimeter Database* (DGFI - OpenADB) e da *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data* (AVISO) (GIEHL, 2020).

Para garantir a confiabilidade nos produtos oriundos da ALTSAT é fundamental que a órbita do satélite seja determinada de forma precisa (*Precise Orbit Determination – POD*). Pois, a posição do satélite é que fornece a referência para as observações da ALTSAT. Pode-se utilizar diferentes sistemas de rastreamento para a determinação do POD, exemplo: *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS), sistema de posicionamento global com receptores GNSS, *Satellite Laser Ranging* (SLR), dentre outros (DALAZOANA, 2005; GIEHL & DALAZOANA, 2022).

Desde meados da década de 1990, são lançados satélites altimétricos que possuem características orbitais semelhantes. O objetivo desses lançamentos é o de aprimorar a tecnologia e aumentar a série temporal de observações do nível do mar, por meio da ALTSAT.

Os dados oriundos dessas missões altimétricas possuem um padrão comum para permitir o estudo de fenômenos oceânicos ao longo do tempo e do espaço (GIEHL, 2020).

A primeira missão desenvolvida com a finalidade de obter informações altimétricas foi denominada de SKYLAB (1973). Em seguida as missões GEOS-3 (1975), SEASAT-1 (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), T/P (1992), os da série Jason (Jason-1 em 2001, Jason-2 em 2008 e Jason-3 em 2016), CryoSat-2 (2010), SARAL (2013), Sentinel 3A (2016), Sentinel 3B (2018), CFOSAT (2018), Sentinel 6A (2020), SWOT (2022) e Sentinel 6B (2025). A Figura 3 ilustra quais as missões que possuem dados disponíveis e qual o espaço temporal de disponibilização de dados dessas missões (SEEBER, 2003; AVISO, 2020; ESA, 2022; ESA, 2023; ESA, 2023a).

Missões / Estágio		Missões passadas			Missões atuais			Missões Futuras	
Sentinel-6B									
SWOT									
Jason-C5/Sentinel-6A									
CFOSAT									
Sentinel-3B									
Sentinel-3A									
Saral									
HY-2									
Cryosat-2									
Jason-3									
Jason-2									
Jason-1									
T/P									
Envisat									
ERS-2									
ERS-1									
Geosat Follow-on									
Geosat									
Intervalo	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2025

Figura 3: Período de disponibilização de dados das principais missões altimétricas oceânicas.

Fonte: Adaptado de AVISO (2020).

Giehl (2020) fez uma síntese histórica da evolução das missões altimétricas, inicia com o reconhecimento do potencial da ALTSAT pelo Congresso de Williams-Town (1969) e o lançamento da primeira missão com a finalidade de medição do geoide marinho em 1970. Ainda, apresenta características de alguns satélites altimétricos, bem como, descreve objetivos e resultados obtidos com os dados disponíveis dessas missões.

Juntamente com a missão Sentinel-6, o satélite *Surface Water Ocean Topography* (SWOT) configura entre as mais recentes e futuras missões para monitoramento oceânico. O SWOT está sendo desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) em conjunto com o *Centre National d'Études Spatiales* (CNES), com contribuições da *Canadian Space Agency* (CSA) e da *United Kingdom Space Agency* (UKSA) (JPL-NASA, 2020).

De acordo com a JPL-NASA (2020), o satélite SWOT passará por 7 fases de implementação. Atualmente, a missão está na fase 5, ou fase D, que é a fase do lançamento. Essa etapa de implementação foi concretizada em 15 de dezembro de 2022. A próxima fase será a de amostragem rápida com uma órbita repetida de 1 dia, a uma altitude de 857 km.

A promessa dessa missão é cobrir a maioria dos corpos oceânicos e de água doce do planeta Terra. Serão fornecidas informações topográficas da superfície dos oceanos e variações temporais dos corpos hídricos em geral (JPL-NASA, 2020). A diferença dessa missão para as demais está no emprego da altimetria de faixa ampla (*wide-swath altimetry*).

2.1.2 As missões Sentinel

A agência espacial europeia (*European Space Agency – ESA*) com o objetivo de substituir antigas missões de observação da Terra e garantir a continuidade de dados para pesquisas em andamento sobre esse tema, principalmente para suprir as necessidades do programa *Copernicus*, desenvolveu uma série de missões e denominou-as de Programa Sentinel. Cada missão Sentinel atende a um determinado objetivo e é baseada em uma constelação de satélites, que servem para atender requisitos de revisita e cobertura (ESA, 2022a).

As missões Sentinel são Sentinel-1; Sentinel-2; Sentinel-3; Sentinel-4; Sentinel-5; Sentinel-5P; Sentinel-6 e Sentinel *Expansion*. Todas elas apresentam como seus componentes radares e instrumentos multiespectrais para imageamento, com a finalidade de monitoramento terrestre, oceânico e atmosférico. Cada missão apresenta características e objetivos distintos e são elas (ESA, 2022a):

- a) Sentinel-1, composto por 2 satélites em órbita polar, com operação diurna e noturna, tem por objetivo o monitoramento terrestre e oceânico da Terra. As imagens são obtidas por radar, adquiridas independente do clima da região imagiada;
- b) Sentinel-2, também composto por 2 satélites em órbita polar que fornecem imagens ópticas de alta resolução, tem por objetivo o monitoramento terrestre com foco na vegetação, solo e áreas costeiras;
- c) Sentinel-3, composto por 3 satélites tendo como principal instrumento um radar altímetro. Tem por objetivo a observação marinha, com foco na determinação da topografia da superfície do mar e temperatura da superfície do mar e da Terra;
- d) Sentinel-4, composto por 1 satélite, tem como objetivo o monitoramento atmosférico;
- e) Sentinel-5, composto por 1 satélite, tem por objetivo o monitoramento da qualidade do ar;
- f) Sentinel-5P, composto por 1 satélite, tem por objetivo o monitoramento da qualidade do ar, preenchendo a lacuna de dados e fornecendo continuidade de dados entre a finalização da missão Envisat e a missão Aura da NASA; e
- g) Sentinel-6, composto por 2 satélites, tem por objetivo o estudo da altimetria terrestre utilizando como referência a altimetria de radar.

Essas missões estão no centro do programa Copernicus, liderado pela Comissão Europeia. Os dados produzidos por esse conjunto de satélites ajudam a enfrentar, segundo ESA (2022b), “desafios como: urbanização, segurança alimentar, aumento do nível do mar, diminuição do gelo polar, desastres naturais e alterações climáticas”.

O programa *Copernicus Sentinels* tem como planos expandir a gama de missões e satélites no espaço ao planejar as seguintes missões e objetivos, dentro das missões *Sentinel Expansion*:

- a) *Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment* (CHIME): missão de imagem hiperespectral para o meio ambiente;
- b) *Copernicus Imaging Microwave Radiometer* (CIMR): missão de obtenção de imagens radiométricas;
- c) *Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring* (CO2M): monitoramento antropogênico de dióxido de carbono;
- d) *Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimeter* (CRISTAL): missão para medir a topografia do gelo e neve polar;
- e) *Copernicus Land Surface Temperature Monitoring* (LSTM): monitoramento da temperatura da superfície terrestre;
- f) *Copernicus Radar Observation System for Europe in L-band* (ROSE-L): missão para obtenção de dados por meio de SAR de banda L, entre outros.

2.1.3 Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich

A missão Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich recebeu o nome do diretor da divisão de Ciências da Terra da NASA, pois ele foi fundamental para a efetivação da parceria internacional envolvida nesta missão. Ela é resultado dos esforços conjuntos das instituições Copernicus (Comissão Europeia), ESA, Organização Europeia para a Exploração de Satélites Meteorológicos (do inglês, *European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites* - EUMETSAT), NASA e Administração Nacional Oceânica e Atmosférica (do inglês, *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA) (ESA, 2022c).

O sistema Sentinel-6 é composto por dois satélites idênticos lançados em momentos distintos. O S6A foi lançado em 2020 e terá capacidade de obter dados por 5,5 anos, podendo prorrogar por mais 2 anos. O Sentinel-6B tem seu lançamento programado para 2025, quando substituirá o satélite anterior. Ao todo, a missão tem por objetivo geral coletar dados até 2030, podendo prorrogar por mais 2 anos, por conta da capacidade de alimentação do sistema (DONLON et al., 2021).

A Copernicus Sentinel-6 Michael Freilich tem por objetivos específicos (ESA, 2022d):

- a) continuar o monitoramento e a disponibilização de observações altimétricas das missões Jason e TOPEX/Poseidon;
- b) atender as necessidades dos serviços Copernicus e de outros serviços operacionais com excelente confiabilidade e pontualidade na entrega de dados;
- c) subsidiar pesquisas científicas referentes a altimetria;
- d) continuar a séries de observações altimétricas na órbita de referência de 66°;
- e) contribuir para os estudos da oceanografia costeira;
- f) contribuir para os estudos da meteorologia marinha; e
- g) contribuir para a determinação de águas interiores, como rios, lagos e outros corpos hídricos.

Algumas características gerais do sistema de satélites Sentinel-6 são (ESA, 2022; ESA, 2022d):

- a) está em uma órbita classificada como baixa e não sincronizada com o Sol;
- b) tem resolução temporal de 9,92 dias;

- c) possui altitude média de 1.336 km, com inclinação de 66°, fornecendo cobertura da superfície terrestre entre os paralelos de 66° norte e 66° sul da linha do Equador;
- d) a plataforma é derivada da missão CryoSat da ESA;
- e) cada satélite possui massa de 1191 kg e consome 891 W;
- f) tem a capacidade de armazenar 1200 Gb/dia de dados;
- g) possui como instrumentos um altímetro de radar de dupla frequência (Poseidon-4), radiômetro de micro-ondas, receptores de sinais GNSS e DORIS, conjunto de retrorrefletores a laser, receptor GNSS-RO TriG e monitor de ambiente de radiação;
- h) durante a fase de lançamento e operações iniciais foi controlado pelo Centro de Operações de Satélites da ESA;
- i) a verificação de órbita, comissionamento e operações de rotina são controlados pela EUMETSAT, assim como a disponibilização de dados;
- j) possui duas estações terrestres de operações, são Fairbanks (NOAA) e Kiruna (ESA).

A órbita de referência do S6A é sobreposta a mesma órbita do Jason-3 e a do Sentinel-6B será a mesma do S6A. Segundo Donlon et al. (2021), a missão herda esta escolha de órbita para garantir a estabilidade a longo prazo do registro do nível do mar a partir do espaço e das medições. As missões TOPEX/Poseidon (T/P), Jason e Sentinel-6 formam esse conjunto com a mesma órbita e possuem altímetros capazes de fornecer medições compatíveis com outros sistemas: os de alta inclinação de órbita (CryoSat-2) e os de órbita polar (Sentinel-3).

A determinação da órbita precisa é feita por meio: do posicionamento com GNSS, posicionamento por Doppler (DORIS) e por um conjunto de retrorrefletores *laser* (SLR / LLR). As antenas do GNSS estão programadas para captar os sinais do Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) e do Galileo. Para a determinação precisa do tempo atômico, o sistema utiliza um pulso elétrico a cada segundo inteiro como referência para todos os equipamentos que são sincronizados, isso, quando o sistema GNSS a bordo está em funcionamento (ESA, 2022f).

O satélite Sentinel-6 possui um altímetro denominado de Poseidon-4 projetado para realizar medidas de radar de abertura sintética de alta resolução. Comprovadamente pelas missões CryoSat da ESA e Copernicus Sentinel-3, a altimetria do modo SAR oferece uma melhora significativa comparada com a altimetria com radar convencional (redução do ruído aleatório) (ESA, 2022f).

Esse equipamento opera com duas frequências (C e Ku), com apontamento para o nadir. Nas duas frequências, apenas a Ku opera em SAR. A frequência Ku é a principal do altímetro e tem por finalidade a obtenção das medições de altura da superfície e a frequência de banda C é usada para correções da ionosfera, medições de células de chuva e estimativas de rugosidade da superfície (DONLON et al., 2021).

A ASM derivada deste altímetro é obtida considerando o elipsoide de referência *World Geodetic System* 1984 (WGS84). A altitude da superfície do mar é calculada pela diferença entre o alcance do altímetro (*range*), corrigido dos efeitos atmosféricos e do estado do mar, e da altitude do satélite (fornecido pelo sistema POD) (ESA, 2022f).

Os pulsos do Poseidon-4 ao passarem pela troposfera úmida sofrem um atraso significativo no tempo de propagação. Isso, devido às cargas atmosféricas de vapor d'água. Um instrumento a bordo do Sentinel-6, denominado de *Advanced Microwave Radiometer for Climate* (AMR-C), é utilizado para fornecer esses dados de atraso para gerar uma correção. O vapor para ser modelado exige que as observações sejam feitas com grande variabilidade

espacial e temporal. A resolução espacial e temporal do satélite é um fator complicador para a modelagem do vapor d'água, a partir das observações do radiômetro a bordo do satélite (MAIWALD et al., 2020).

O AMR-C é um sistema de micro-ondas classificado como passivo e possui três canais para separar: o vapor de água atmosférico, água líquida na nuvem e a rugosidade da superfície do oceano induzida pelo vento. Esse sistema, ainda, inclui uma calibração suplementar para melhorar os problemas sistêmicos que ocorriam nos radiômetros de micro-ondas usados nas missões T/P e Jason (EVERS-KING, 2022).

Os níveis de processamento da missão são divididos em 4 níveis principais, são eles:

- a) nível-0: sem nenhum tipo de processamento, ou seja, dados brutos telemétricos, datados e com a geolocalização inicial;
- b) nível-1: são dados do nível-0 corrigidos dos erros sistemáticos e geométricos. Isso é dividido em várias etapas, com produtos associados a cada uma delas, por exemplo: nível 1A, nível 1B e nível 1B-S;
- c) nível-2: são os dados do nível 1B corrigidos dos efeitos geofísicos e incluindo os seguintes produtos *Sea Surface Height Anomaly* (ASMA), *Significant Wave Height* (SWH) e velocidade do vento.
- d) nível-2P: são os dados do nível-2 formatados para corresponder a um conjunto padrão entre todas as missões de altimetria. Vieses globais e regionais do nível do mar são corrigidos em relação a uma missão de referência e correções empíricas são aplicadas para remover erros do nível anterior (EVERS-KING, 2022a).

Os produtos oriundos da missão são oferecidos gratuitamente e podem ser acessados por meio do serviço EUMETCast ou EUMETSAT *Data Center*, ambos oferecidos e gerenciados pela EUMETSAT. Dependendo do tempo de obtenção dos dados, processamento e disponibilização, os produtos podem ser classificados como (ESA, 2022g):

- a) tempo quase real (do inglês, *Near-Real Time* - NRT), recomendados para agências meteorológicas, os produtos são disponibilizados três horas após a aquisição dos dados, possuem formato NetCDF e BUFR.
- b) curto tempo crítico (do inglês, *Short Time Critical* - STC), são recomendados para modelagem e assimilação oceânica, os produtos são divididos por passagem do satélite (trilhas), são disponibilizados em até 36 horas após a aquisição dos dados, estão disponíveis no formato NetCDF, e
- c) tempo não crítico (do inglês, *Non Time Critical* - NTC), são dados de alta qualidade, destinados a estudos e pesquisas climáticas, divididos por trilhas, os produtos são entregues após 60 dias da aquisição dos dados e estão disponíveis no formato NetCDF.

Os produtos disponibilizados pela EUMETSAT são mostrados pela Tabela 1.

Tabela 1. Produtos disponibilizados pela EUMETSAT e formas de distribuição.

Produtos	Meios de distribuição
Poseidon-4 / Nível 1A / Alta resolução em NTC	SFTP / EUMETCast / Data Center
Poseidon-4 / Nível 1B / Baixa resolução em STC	SFTP / Data Center
Poseidon-4 / Nível 1B / Baixa resolução em NTC	SFTP / EUMETCast / Data Center
Poseidon-4 / Nível 1B / Alta resolução em NTC	SFTP / EUMETCast / Data Center
Poseidon-4 / Nível 2 / Baixa resolução em NRT	SFTP / EUMETCast / Data Center / GTS
Poseidon-4 / Nível 2 / Baixa resolução em STC	SFTP / Data Center
Poseidon-4 / Nível 2 / Alta resolução em NRT	SFTP / EUMETCast / Data Center / GTS
Poseidon-4 / Nível 2 / Alta resolução em STC	SFTP / EUMETCast / Data Center
Poseidon-4 / Nível 2 / Alta resolução em NTC	SFTP / EUMETCast / Data Center
Radiômetro de micro-ondas / Nível 2 / qualidade climática em STC	SFTP / Data Center
Radiômetro de micro-ondas / Nível 2 / qualidade climática em NRT	SFTP / Data Center
Radiômetro de micro-ondas / Nível 2 / qualidade climática em NTC	SFTP / EUMETCast / Data Center

Fonte: ESA (2022h).

Todos os produtos NTC são reprocessados sistematicamente todos os anos. Esse reprocessamento faz-se necessário para manter os produtos (derivados da missão) atuais, considerando as melhorias e novos algoritmos introduzidos no conjunto de processamento.

2.2 Sistema Vertical

2.2.1 Superfícies geodésicas de referência

Ao longo dos anos, a definição de Geodésia tem experimentado diversas interpretações conforme a evolução tecnológica e o surgimento de novas técnicas e metodologias para o estudo da forma e dimensão da Terra, bem como a determinação do campo da gravidade e sua variação com o tempo. Desde a primeira definição, promovida por Helmert, a Geodésia tem sido impactada por alterações em seus objetos de estudo e por mudanças nas técnicas e metodologias para atingir seus objetivos.

A forma da superfície terrestre está diretamente associada ao campo da gravidade da Terra. Isso se deve a uma superfície equipotencial, ajustada ao NMM2 não perturbado, prolongado para o interior dos continentes. Essa superfície de mesmo potencial da gravidade é denominada de superfície geoidal, que delimita o geoide, a figura matemática que mais se aproxima da forma terrestre (FREITAS, BLITZKOW, 1999; TORGE, 2001). A Figura 4 ilustra geoide obtido do EIGEN-6C4, um modelo global do campo de gravidade combinado.

² **NMM:** Média entre os valores registrados de nível instantâneo do mar, considerando um determinado intervalo de tempo.

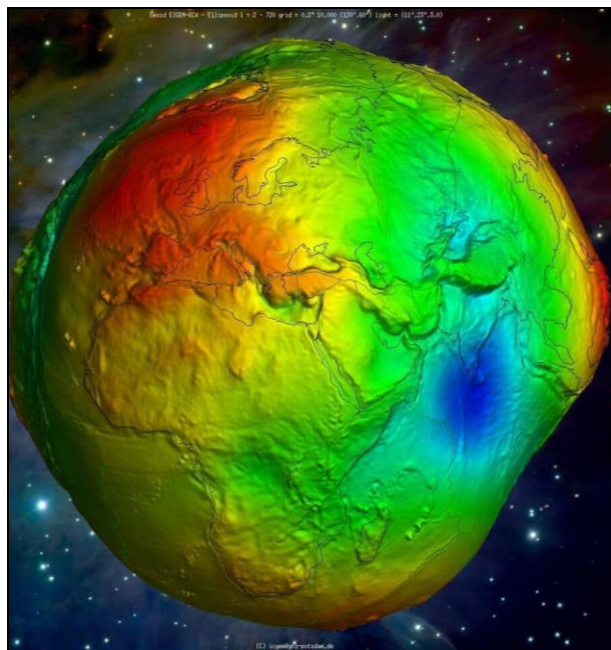


Figura 4: Representação do Geoide.

Fonte: Adaptado de GGOS (2022).

Existem duas formas para se determinar o geoide. Basicamente (FREITAS; BLITZKOW, 1999):

- a) determina-se uma função potencial através da solução do Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG), ou;
- b) estuda-se diretamente a forma, obtendo as irregularidades da superfície geoidal relativamente a um modelo teórico.

Nicacio e Dalazoana (2019) apresentam revisão conceitual sobre o PVCG aplicado na vinculação nacional a um sistema vertical de referência global. Eles sintetizam o conceito de PVCG em 3 vertentes diferentes: o PVCG de Dirichlet, o PVCG de Neumann e o PVCG de Hilbert. A solução do PVCG apresenta diferentes abordagens, que são as do PVCG livre, o PVCG escalar livre e o PVCG fixado nas formas linearizada e simples.

Uma alternativa para a determinação do geoide é a adoção de um modelo teórico, ou também, chamado de modelo geométrico, denominado de elipsoide de revolução. Este, limitado pela superfície elipsoidal. Esse modelo matemático é um sólido geométrico criado pela rotação de uma elipse em torno de seu semieixo menor. É determinado, geodesicamente, pelo achatamento (f) e pelo semieixo maior (a). A Equação 4 ilustra a determinação do semieixo menor (b) (RAPP, 1991).

$$b = a - (a * f) \quad (4)$$

A excentricidade do elipsoide (e) é uma constante muito importante para a Geodésia. Pois, essa componente permite obter a divergência da elipse em relação a circunferência, variando de 0 a 1. A maioria dos modelos elipsoidais adotados pela Geodésia possui excentricidade próxima de zero. Nos cálculos geodésicos, utiliza-se a Equação 5 para determinar a excentricidade e a Equação 6 para a segunda excentricidade (RAPP, 1991):

$$e = \sqrt{\left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right)} \quad (5)$$

$$e' = \sqrt{\left(\frac{a^2 - b^2}{b^2}\right)} \quad (6)$$

A Figura 5 ilustra uma representação básica de uma elipse. Essa figura apresenta como O, o centro da elipse, F1 e F2 como os focos, P um ponto qualquer na superfície da elipse, distância OP1 como semieixo menor (b), distância OB como semieixo maior (a) (RAPP, 1991).

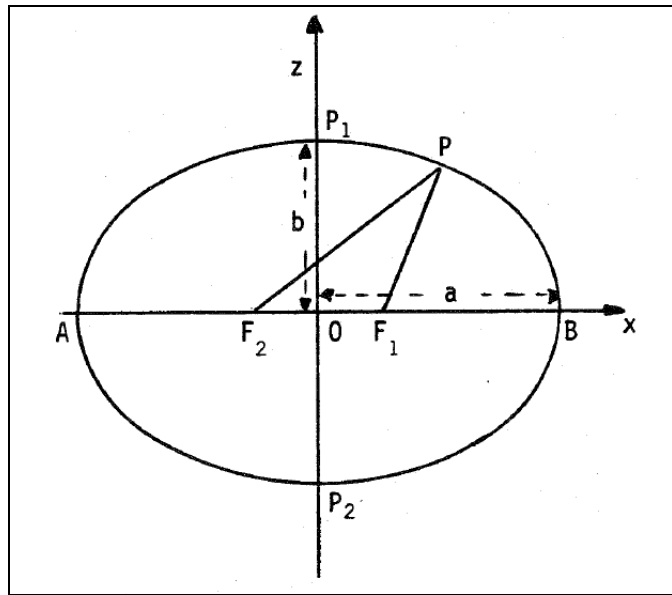


Figura 5: Representação da elipse.

Fonte: Adaptado de RAPP (1991).

A relação geométrica entre o geóide e o elipsoide de revolução pode ser determinada por meio do desvio da vertical e da ondulação geoidal. Seja um ponto na superfície física da Terra, esse ponto pode ser ligado aos dois modelos. Quando essa ligação ocorre pela reta vertical (linha de prumo), estamos associando o ponto ao geóide e quando ocorre a ligação pela reta normal, tem-se uma relação do ponto com o elipsoide. Como as retas possuem suas particularidades, há uma diferença entre elas que é medida por um ângulo, chamado de desvio da vertical (ESPIAGO, 2022).

O cálculo do desvio da vertical (i) não é feito diretamente, pois não há formas de obter, exatamente, a localização dessas superfícies de referência. O desvio da vertical é calculado por meio da determinação dos componentes ξ e η . Que, são denominados, respectivamente, componente meridiana e componente 1º vertical. As Equações 7; 8; 9; 10 e 11, ilustram as fórmulas para a determinação dos componentes e suas aplicações (GEMAEL, 1999):

$$\eta = (\Lambda - \lambda) * \cos(\phi) \quad (8)$$

$$\eta = (A_a - A_g) * \cotg(\phi) \quad (9)$$

$$i^2 = \eta^2 + \xi^2 \quad (10)$$

$$A_g = A_a - (\Lambda - \lambda) * \sen(\phi) \quad (11)$$

Em que: ξ é a componente meridiana; η é a componente do primeiro vertical; Φ é a latitude astronômica; ϕ é a latitude geodésica; Λ longitude astronômica; λ é a longitude geodésica; A_a é o azimute astronômico, A_g é o azimute geodésico e i é o desvio da vertical.

A separação entre a superfície do geoide e a superfície do elipsoide de revolução são as chamadas alturas geoidais ou ondulação geoidal. Essa separação é calculada no contexto da Geodésia Física, segundo Freitas & Blitzkow (1999), de duas formas:

- combinando um modelo do geopotencial com dados gravimétricos oriundos de satélites artificiais ou dados gravimétricos da superfície terrestre, por meio da integral modificada de Stokes ou;
- utilizando uma solução local a partir de observações sobre satélites artificiais do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) conduzidas sobre uma ou várias referências de nível.

A definição e a utilização do geoide, como forma da Terra, e do elipsoide de revolução como figura matemática para a referência e representação terrestre é comum nas atividades geodésicas. Cada uma tem por objetivo, resumidamente: ser o modelo real, ou a forma mais aproximada da Terra (geoide) e ser o modelo teórico, ou geométrico, para a realização dos cálculos geodésicos e do posicionamento pelo GNSS (elipsoide de revolução), respectivamente.

Quando o foco é o estudo da gravidade e sua variação com o tempo, outras superfícies geodésicas de referência são consideradas. Por exemplo: o teluroide, o quase-geoide, geopes e esferopes. O teluroide é uma superfície geodésica de referência em que cada ponto sobre sua superfície possui potencial normal igual ao potencial da gravidade do ponto correspondente na superfície física ($U_Q = W_P$). O quase-geoide é determinado quando a anomalia de altura é plotada partindo da superfície do elipsoide de revolução. No quase-geoide não há vínculo com o campo da gravidade (GUIMARÃES; BLITZKOW, 2011).

Os geopes são superfícies que possuem o mesmo valor de potencial da gravidade, mas que podem não estar relacionadas com o NMM não perturbado. Pode-se concluir que todo geoide é um geope, mas nem todo geope é um geoide (GEMAEL, 1999; CARGNELUTTI, 2007).

Para compreender o conceito de esferope, necessita-se inicialmente apresentar o conceito de Terra Normal. Quando se atribui a mesma velocidade angular e a massa terrestre a um elipsoide de revolução, tem-se a Terra Normal. Suponha que a Terra Normal possua um campo da gravidade, denominado de campo da gravidade normal, as superfícies equipotenciais do campo da gravidade normal são chamadas de esferopes (HOFMANN-WELLENHOF E MORITZ, 2006; ARANA, 2009). A Figura 6 ilustra todas as superfícies geodésicas de referência apresentadas anteriormente.

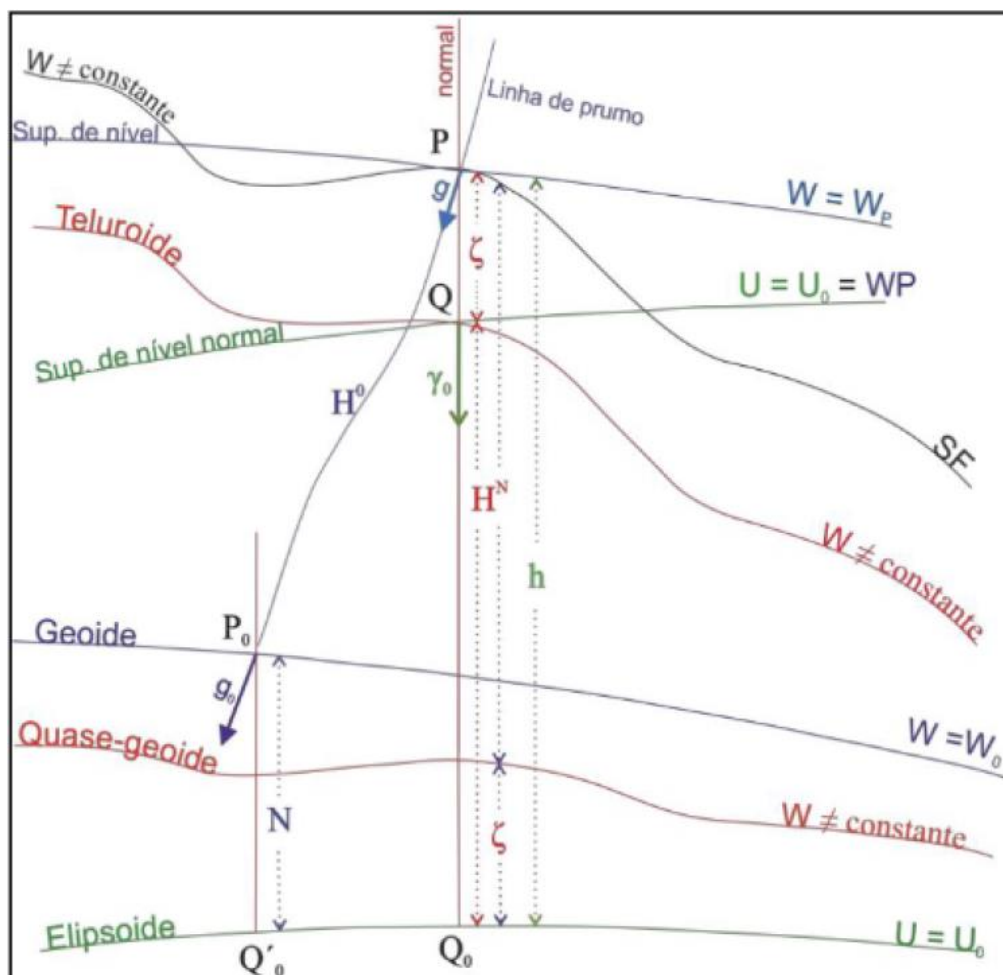


Figura 6: Superfícies geodésicas de referência.

Fonte: Adaptado de Carrión (2017)

2.2.2 Sistema de altitudes

A definição de altitude encontra na literatura interpretações distintas, mas todas convergem, resumidamente, para a distância entre duas superfícies geodésicas de referência que representam a forma da Terra. Apenas no Brasil, há essa separação entre os termos altitude e altura, em países de língua inglesa, o termo para representar qualquer medida vertical é *height*. Em países de língua espanhola, principalmente os que participam do projeto Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS), o termo utilizado é altura. Essa diferença de adoção entre termos, apresenta uma certa dificuldade para integração internacional no que tange a discussão de problemas e soluções voltadas a componente altimétrica (FREITAS; BLITZKOW, 1999).

As altitudes geométricas, também altitudes do tipo geométrico, podem ser divididas em altitudes niveladas e altitudes elipsoidais. As altitudes niveladas são obtidas através do nivelamento geométrico. As irregularidades do terreno e o campo de gravidade da região considerada influenciam na obtenção dessas altitudes.

As altitudes elipsoidais têm por finalidade a representação da distância entre a superfície física da Terra e a superfície do elipsoide de revolução, contada ao longo da reta normal. Esse tipo de altitude geométrica é muito utilizado no posicionamento com receptores do GNSS. Mas, essa componente altimétrica não possui nenhum vínculo com o campo de

gravidade terrestre, o que exige nos trabalhos de engenharia certa atenção com a sua utilização.

As altitudes científicas podem ser de diversos tipos, por exemplo: altitude ortométrica, altitude normal, altitude de Helmert, altitude de Vignal, altitude de Niethammer, altitude de Mader, altitude de Mueller, altitude de Ramsayer, altitude de Ledersteger e altitude de Baranov. Maiores detalhes sobre os sistemas de altitudes recomenda-se a leitura das seguintes bibliografias: Gemael (1999); Freitas e Blitzkow (1999); Sánchez (2002); Hofmann-Wellenhof e Moritz (2006) e Arana (2009).

2.2.3 Sistemas geodésicos de referência (SGRs)

Com o propósito de implementar uma infraestrutura que permitisse o monitoramento geodésico das variações temporais e espaciais do sistema Terra, a *International Association of Geodesy* (IAG) determinou a criação do *Global Geodetic Observing System* (GGOS). Dividido em 3 áreas de foco, o GGOS reúne colaboradores internacionais para tratar de questões específicas de cada uma dessas áreas. Mais detalhes sobre a definição, o propósito de cada uma dessas áreas e os avanços obtidos podem ser encontrados em GGOS (2023).

O uso de Sistemas Geodésicos de Referência (SGRs) apresenta uma grande importância para a determinação das mudanças no sistema Terra. Os propósitos preconizados pela IAG e o GGOS requerem que um SGR seja estável ao longo do tempo e apresente consistência homogênea em todo o globo. Caso haja inconsistências entre os objetivos de análise, modelos ou produtos relacionados à geometria e ao campo de gravidade da Terra, essas, devem ser solucionadas (IHDE et al., 2015; GIEHL, 2020).

Para solucionar as inconsistências do parágrafo anterior, a IAG criou o *Global Geodetic Reference System for Sustainable Development* (GGRS), visando determinar um sistema de referência que fosse comum para a geometria e o campo de gravidade terrestre. O GGRS envolve a integração de diferentes SGRs. São eles: ITRS-ITRF (*International Terrestrial Reference System - International Terrestrial Reference Frame*), IHRS-IHRF (*International Height Reference System - International Height Reference Frame*), ICRS-ICRF (*International Celestial Reference System - International Celestial Reference Frame*) e ITGRS-ITGRF (*International Terrestrial Gravity Reference System – International Terrestrial Gravity Reference Frame*) (SANCHEZ et al., 2023). Maiores detalhes sobre a definição (*system*) e a realização (*frame*) do GGRS podem ser obtidos em IAG (2016).

Para determinar as variações anuais/milimétricas do NMM faz-se necessário o conhecimento de uma posição global de referência, que seja estável. Considerando, também, o intervalo de tempo. Para isso, é necessário definir um sistema de altitudes que atenda aos requisitos e normas do GGOS. A resolução nº 1 de 2015 da IAG, determina as convenções e parâmetros necessários para a definição do IHRS (IAG, 2015).

As convenções e os parâmetros para a definição do IHRS são importantes para a materialização de uma rede altimétrica global, denominada de IHRF. Em IHDE et al. (2017) é possível obter maiores detalhes sobre as principais propostas para o estabelecimento do IHRF.

A criação do sistema de referência altimétrico IHRS/IHRF tem por uma das justificativas a dificuldade de integração dos dados altimétricos entre os países, justamente pelo fato de que cada um possui uma origem vertical estabelecida de maneira clássica. Em termos técnicos, essa origem recebe o nome de *Datum*. A maneira clássica consiste em obter o

NMM por meio de longas séries de observação da maré e conectá-lo a uma Referência de Nível (RN) situada próxima do marégrafo (DALAZOANA, 2005).

O NMM observado pelos marégrafos não pode ser considerado quando o foco é uma análise global, pois cada *Datum* vertical é referido a uma superfície equipotencial, essa, associada a uma determinada época e que não coincide com o geoide global. Também, porque o NMM possui variações temporais e espaciais (SÁNCHEZ, 2002). A diferença entre o NMM e a superfície do geoide global é definida por Topografia do NMM (TNMM). Ela ocorre devido à pressão atmosférica, correntes, dentre outros fatores (SEEBER, 2003).

Os sistemas altimétricos sul-americanos tiveram seus *data*³ definidos entre os anos de 1940 e 1950. O NMM foi definido considerando, no mínimo, nove anos de observações maregráficas. A partir disso, considerou-se que o geoide local era coincidente com esses níveis médios do mar. Com os *data* definidos, cada país criou sua rede de referência altimétrica e com a densificação destas foi possível a interligação entre marégrafos e entre redes verticais de países vizinhos (FREITAS et al., 2002).

A interligação das redes verticais de países fronteiriços permitiu verificar a diferença das altitudes de estações pertencentes a rede. A discrepância existente entre a rede vertical da Argentina e a rede vertical do Brasil era de 19,37 centímetros. Essa diferença pode ser explicada pela ótica do nivelamento geométrico e do estabelecimento do nível de referência e suas variações espaço-temporais (FREITAS et al., 2002; DALAZOANA, 2005).

2.2.4 Rede altimétrica da Argentina

A rede altimétrica da Argentina apresenta características distintas da rede vertical do Brasil. O Instituto Geográfico Militar (IGM), atualmente Instituto Geográfico Nacional (IGN) iniciou os trabalhos geodésicos em, aproximadamente, 1923, com o objetivo de construir e medir a rede de nivelamento argentina. A origem desta rede foi estabelecida por meio das leituras maregráficas realizadas pela estação que fica localizada no porto de Mar del Plata. As distâncias entre as referências de nível variam de 3 a 9 km. Essa rede de nivelamento materializa o sistema vertical argentino (PACINO et al., 2007; IGN, 2023).

Composta por 2.020 linhas de nivelamento e 33.892 pilares, a rede altimétrica argentina classifica suas linhas de nivelamento em (MOIRANO et al., 2002; PEREIRA, 2009; IGN, 2023):

- a) alta precisão: sua precisão é expressa em milímetros e é calculada pela raiz quadrada do comprimento da linha considerada em quilômetros, multiplicada por 3;
- b) precisão: dividem cada polígono formado pelas linhas de alta precisão em seis ou oito partes. A precisão é expressa em milímetros e é calculada pela raiz quadrada do comprimento da linha considerada em quilômetros, multiplicada por 5; e
- c) topográfica: o principal objetivo desse tipo de rede é densificar as malhas. A precisão é expressa em milímetros e é calculada pela raiz quadrada do comprimento da linha considerada em quilômetros, multiplicada por 7.

Todas as Referências de Nível (RRNN) da rede vertical argentina são compostas por coordenadas geodésicas geocêntricas horizontais. Essa rede possui dois tipos de pontos: pontos rastreados por meio do posicionamento GNSS, com acurácia de alguns centímetros e

³ *Data*: plural de *Datum*.

pontos obtidos por cartas topográficas, que podem apresentar discrepâncias da ordem dos metros na posição horizontal (PACINO et al., 2007).

A realização da rede vertical argentina foi feita considerando a análise e verificação de dados gravimétricos e altimétricos. O objetivo era obter as altitudes ortométricas e normais ao longo das linhas de nivelamento, considerando números geopotenciais e circuito gravimétrico (MOIRANO et al., 2002; PEREIRA, 2009).

2.2.5 Datum vertical

Segundo Gemael (1999), a definição clássica para a origem de um sistema vertical é o NMM local oriundo de determinado período de observações maregráficas, suposto coincidente a uma superfície de mesmo potencial da gravidade da Terra.

Para determinar a componente altimétrica da cadeia de triangulação de 1ª ordem e como consequência, obter as coordenadas dos pontos de apoio básico ao mapeamento da Zona Carbonífera de Santa Catarina, o primeiro *Datum* altimétrico brasileiro foi definido com base nas observações do nível do mar pelo marégrafo de Torres/RS. Em caráter provisório, o período considerado foram as observações de 1919 e 1920 (ALENCAR, 1990).

O *Datum* de Torres foi substituído pelo de Imbituba em 1958, pois este, contava com uma série temporal de observações maregráficas de 9 anos, enquanto de Torres apenas um ano. O NMM local em Imbituba foi definido como o valor médio das médias anuais das observações maregráficas indicadas pela Tabela 2.

Tabela 2 - Médias anuais em Imbituba entre 1949 e 1957.

Ano	Média (m)
1949	2,2616
1950	2,2770
1951	2,2587
1952	2,2860
1953	2,2555
1954	2,3044
1955	2,2831
1956	2,2738
1957	2,2587
Valor médio	2,2732

Fonte: Adaptado de Alencar (1990).

Para o transporte da altitude obtida no marégrafo de Imbituba, foram definidas e materializadas estações denominadas de Referências de Nível (RRNN). O objetivo dessas RRNN⁴ era formar uma rede vertical para o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Por nivelamento geométrico, todas as RRNN do SGB foram referidas ao NMM local obtido pelas observações maregráficas de Imbituba – SC. Há uma rede vertical localizada no estado do Amapá, que não está referenciada ao NMM de Imbituba. Essas altitudes estão referenciadas ao *Datum* local definido no porto de Santana/AP (DALAZOANA, 2005).

⁴ RRNN: plural de Referência de Nível – Referências de Nível.

2.2.6 Marégrafo

Fontes de medições históricas do nível do mar com precisão, os marégrafos são equipamentos que estão localizados em regiões portuárias e compõem um conjunto de instrumentos voltados para a determinação e avaliação de *data* altimétricos. Tradicionalmente, as observações maregráficas, oriundas dos marégrafos, são utilizadas para avaliação do NMM local, previsão das marés de um determinado local e definição do *Datum* de sistemas verticais de referência clássicos (CALADO, et al., 2019).

Com o avanço tecnológico, os marégrafos passaram a ser compostos não apenas por réguas de marés e maregramas, mas também, por equipamentos de medição digital (Radar e Encoder). As leituras das réguas de marés proporcionavam uma acurácia de 2 cm, em situações de águas calmas, mas para fins geodésicos, essas observações maregráficas tornaram-se obsoletas. Atualmente, as réguas de marés são fundamentais para a verificação de possíveis erros sistemáticos nos marégrafos, determinados utilizando o Teste de Van de Casteele (DALAZOANA, 2005).

Existem diferentes tipos de sistemas de observações do nível do mar (marégrafos), que foram desenvolvidos ao longo dos anos, como por exemplo (GIEHL, 2020):

- a) *stilling-well*: desenvolvido em 1665, consistia em um tubo vertical e a água entrava por baixo do tubo. Essa era uma medição precisa do nível do mar, pois, as altas frequências eram minimizadas;
- b) marégrafo com registrador automático: construído em 1831, esse equipamento registrava as variações da maré a partir dos movimentos verticais de uma boia flutuante. Essa boia era conectada a uma pena, que gravava os movimentos da água em um maregrama. Esse maregrama era enrolado em um cilindro, programado para rotacionar em um determinado intervalo de tempo;
- c) marégrafo de pressão: mede a pressão em um ponto fixo abaixo do nível do mar e determina os valores do nível da água com base nas relações básicas de pressão hidrostática. A pressão aumenta em proporção direta ao aumento do nível da água;
- d) marégrafo por ondas sonoras: a distância é medida pelo intervalo de tempo que um sinal acústico leva para deslocar-se da fonte emissora até uma superfície refletora e retornar; e
- e) marégrafo de radar: é a medida do tempo de ida e volta de um sinal, como ocorre nos sistemas de ondas sonoras, mas neste caso o sinal emitido é a radiação eletromagnética.

2.2.7 Rede maregráfica permanente para geodésia

Proposta em 1997, a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) foi criada para auxiliar a transição para o *Datum* SIRGAS e possibilitar a correlação entre o *Datum* de Imbituba, com outras referências altimétricas pela costa brasileira. A proposta da RMPG originou-se na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), juntamente com a Universidade Federal do Paraná (UFPR), sendo enviada ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A Figura 7 apresenta cartograma das estações da RMPG, juntamente com a rede altimétrica do SGB. A figura também apresenta as estações ativas e inativa da RMPG (LUZ, DE FREITAS, DALAZOANA, 2002). Todas essas estações estão conectadas ao Banco

de Dados Geodésicos (BDG) e as leituras maregráficas estão disponíveis, bastando indicar a data e o horário para o *download* dos dados.

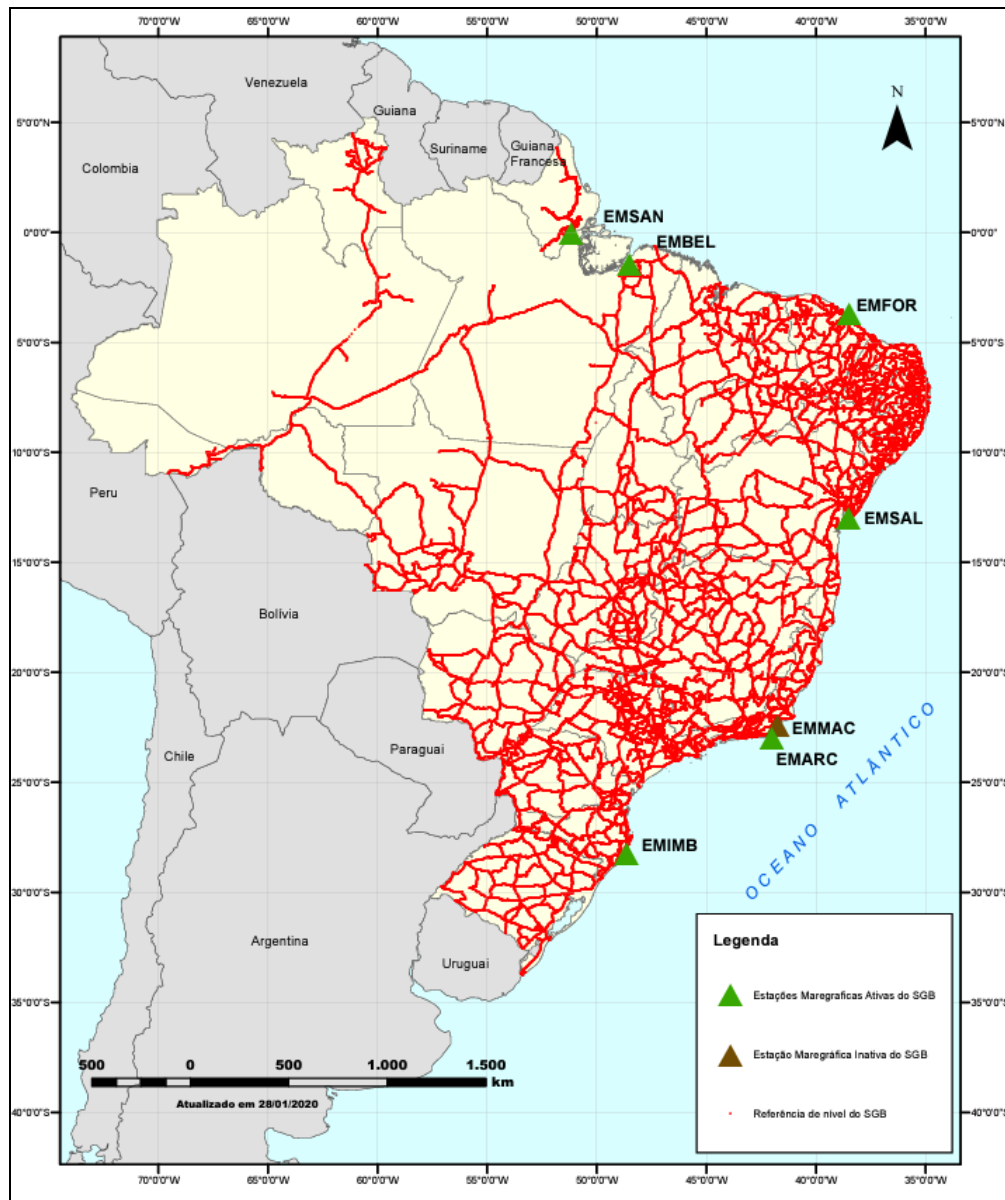


Figura 7: Cartograma das estações da RMPG com a rede altimétrica do SGB.

Fonte: IBGE (2020).

A estação de Macaé (EMMAC) está desativada desde junho de 2015. Mas todas as suas leituras, desde o primeiro até o último registro, estão disponíveis no BDG, ou por meio de solicitação ao IBGE. As estações maregráficas da RMPG possuem no mínimo dois sistemas de coleta de observações, um digital (Radar e Encoder) e um analógico, ambos independentes entre si. O objetivo dessa constituição é a substituição das observações oriundas da medição digital pelas observações oriundas da medição analógica, caso haja interrupção no funcionamento do equipamento digital.

2.3 Métodos Complementares para Avaliação de Dados do Sentinel-6A

2.3.1 Coeficiente de correlação de Pearson

Existem dois tipos de variáveis, as quantitativas e as qualitativas. Quando o objetivo da análise é descrever a associação entre duas variáveis quantitativas, tem-se a determinação da correlação entre essas variáveis. A correlação está diretamente ligada a relação linear entre duas variáveis quantitativas, enquanto o coeficiente de correlação é uma medida da associação entre essas duas variáveis. O coeficiente de correlação de Pearson, denotado por R, é uma medida da direção e grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas (MARTINS, 2014; AZEVEDO, 2016).

O coeficiente de correlação de Pearson pode ser calculado pelo quociente entre a covariância amostral de duas variáveis – Cov (x, y) e o produto dos desvios padrões respectivos (S_x e S_y). A Equação 12 ilustra essa relação matemática (MATTOS, 2010):

$$R = \frac{Cov(x,y)}{S_x S_y} \quad (12)$$

O coeficiente de correlação de Pearson, também pode ser calculado pela fórmula modificada. A Equação 13 ilustra essa fórmula modificada, cujo objetivo é facilitar a obtenção do valor de r (MATTOS, 2010):

$$R_{x,y} = \frac{[n * \sum(x,y)] - [(\sum x) * (\sum y)]}{\sqrt{[(n * \sum x^2) - (\sum x)^2] * [(n * \sum y^2) - (\sum y)^2]}} \quad (13)$$

Em que: x e y são as variáveis observadas e n, a quantidade de observações.

O intervalo de valores que o coeficiente $R_{x,y}$ pertence é de -1 a +1, não possuindo unidade de medida. Para facilitar a interpretação do coeficiente de correlação de Pearson foi criada a Tabela 3. Os resultados para o $R_{x,y}$ podem ser associados aos diagramas de dispersão apresentados na Figura 8.

Tabela 3 - Interpretação do valor da correlação de Pearson.

Valor de R	Tipo de correlação
+1	Correlação perfeita positiva
$0 < R < 1$	Correlação positiva
0	Correlação nula
$-1 < R < 0$	Correlação negativa
-1	Correlação perfeita negativa

Fonte: Mattos (2010).

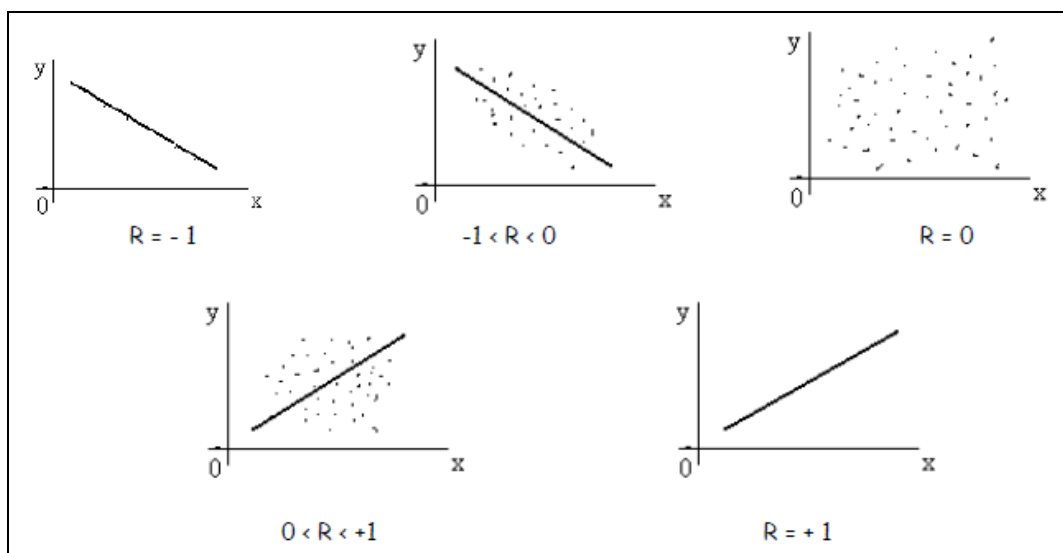


Figura 8 - Diagramas de dispersão relacionados com o valor de R.

Fonte: Adaptado de Mattos (2010).

As propriedades e condições mais importantes que devem ser atendidas para a correta aplicação e análise do coeficiente de correlação de Pearson estão listadas abaixo (MARTINS, 2014):

- o valor de R indica a intensidade da relação linear entre as variáveis consideradas;
- a interpretação dos resultados não deve ser baseada apenas no valor de R, mas também por meio das médias e dos desvios padrões para as variáveis consideradas;
- o valor de R entre X e Y é o mesmo valor de R entre Y e X;
- a presença de *outliers* altera o valor de R; e
- a determinação do valor de R não é alterada se as unidades de medida forem diferentes.

2.3.2 Interpolador de Hermite

As variações do NMGM ocorrem em todo o planeta (DANGENDORF et al., 2019). Ou seja, essas oscilações possuem uma característica, a continuidade. Por isso, esse fenômeno pode ser modelado por uma função contínua.

A interpolação permite a definição de uma função que modela, aproximadamente, os valores conhecidos de um determinado fenômeno. Ela faz-se necessária quando a lei de formação apresenta seus valores numéricos em um certo conjunto de pontos, denominados de nós, e então, os valores dessa função, fora dos nós, são requisitados (BOOR; HÖLLIG; SABIN, 1987; CARVALHO, 2016).

Ao interpolar uma dada função por meio de um polinômio, a ideia é determinar esse de tal forma que (Equação 14):

$$P(X_n) = f(X_n) \quad (14)$$

Em que: n é a quantidade de nós.

A função escolhida para a interpolação deve atender a determinadas propriedades específicas. A interpolação polinomial pode ser inadequada se os nós não forem selecionados corretamente. Em geral, o polinômio interpolador é determinado por um número finito de

parâmetros, os coeficientes. Isso deve ser igual ao número de restrições impostas (ou seja, o número de nós) para que a solução seja única (MELO; OLIVEIRA, 2019).

O polinômio interpolador deve possuir a seguinte forma genérica (Equação 15) (MELO, 2018):

$$P(X_n) = a_1 + a_2 * x + a_3 * x^2 + \dots + a_m * x^c \quad (15)$$

Em que: a, os coeficientes do polinômio; x, a variável; n, o número de nós; m, o número de coeficientes do polinômio; e c, o valor do grau do polinômio.

A interpolação polinomial de Hermite tem por princípio aproximar uma função contínua, definida em um intervalo conhecido, utilizando um polinômio $P(X)$ que satisfaça as seguintes condições: que o valor do polinômio em um determinado ponto seja igual ao valor da função nesse mesmo ponto e que o valor da derivada desse polinômio, em um determinado ponto, seja igual ao valor da derivada da função no mesmo ponto considerado. Essas condições são expressas nas Equações 16 e 17 (HÖLLIG; KOCH, 1995):

$$P(X) = f(X) \quad (16)$$

$$P'(X) = f'(X) \quad (17)$$

O polinômio interpolador que satisfaz as condições da interpolação polinomial de Hermite é denominado de polinômio de Hermite. E para encontrar o valor dos coeficientes desse polinômio (Equação 15) utiliza-se a resolução da matriz de Vandermonde (MELO; OLIVEIRA, 2018), visto que, não é possível determinar a função que modele o fenômeno da variação do NMGM. A Equação 18 ilustra essa matriz.

$$\begin{pmatrix} 1 & X_1 & (X_1)^2 & \dots & (X_1)^c \\ 1 & X_2 & (X_2)^2 & \dots & (X_2)^c \\ 1 & X_3 & (X_3)^2 & \dots & (X_3)^c \\ 1 & X_n & (X_n)^2 & \dots & (X_n)^c \\ 0 & 1 & 2*(X_1) & \dots & c*(X_1)^{c-1} \\ 0 & 1 & 2*(X_2) & \dots & c*(X_2)^{c-1} \\ 0 & 1 & 2*(X_3) & \dots & c*(X_3)^{c-1} \\ 0 & 1 & 2*(X_n) & \dots & c*(X_n)^{c-1} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(X_1) \\ f(X_2) \\ f(X_3) \\ f(X_n) \\ f'(X_1) \\ f'(X_2) \\ f'(X_3) \\ f'(X_n) \end{pmatrix} \quad (18)$$

Em que: X_n é a enésima variável a ser modelada; C é uma constante; a_n é a enésima incógnita da equação; $f(X_n)$ é a enésima função e $f'(X_n)$ é a derivada primeira dessa enésima função.

Devido a característica do fenômeno, variação do NMGM, fez-se necessário a utilização de um interpolador que considere a continuidade na interpolação da função. O Interpolador de Hermite atendeu a essa condição.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Delimitação da Área de Estudo para Leituras Maregráficas

A delimitação da área de estudo teve como objetivo selecionar as observações altimétricas provenientes do altímetro embarcado no S6A. Para obter os valores de ASM, foi considerada uma região com raio de até 100 km em torno do local do marégrafo no oceano. Pois o estado do mar sofre alterações conforme a distância da costa vai aumentando.

A área de estudo compreendeu a região em que o marégrafo de Arraial do Cabo estava instalado (EMARC). Pertencente a RMPG, este marégrafo localiza-se em uma região costeira sem a influência de rios ou regiões de encontros entre o oceano e corpos hídricos de água doce. Ou seja, sem influências que não sejam oriundas do oceano. Também, pela proximidade com a UFRRJ e disponibilidade das leituras maregráficas. Essas características utilizadas como critério de seleção do marégrafo não excluem as outras estações da RMPG, pois a ASM também pode ser obtida e analisada utilizando as leituras maregráficas oriundas dessas estações. Os critérios excludentes seriam: a disponibilidade das variáveis do S6A na região dessas estações da RMPG e a possibilidade de transformação das leituras maregráficas vinculadas ao zero do sensor para o elipsoide de revolução adotado pelo SIRGAS2000.

A seleção dessa área de estudo fez-se necessária, pois as leituras maregráficas transformadas em ASM, foram consideradas como pontos de verificação para avaliar a precisão da ASM obtida pelo S6A. A Figura 9 ilustra a estação maregráfica considerada e a região de estudo ao qual os *footprints* foram recortados para posterior análise dos dados altimétricos.

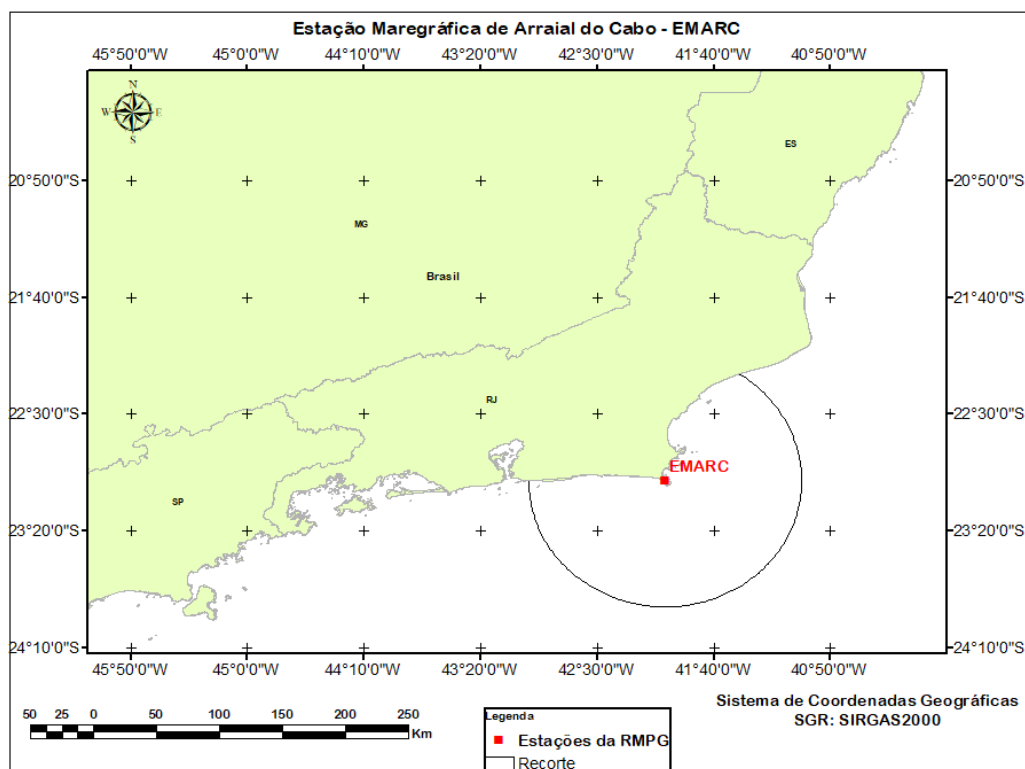


Figura 9 - Mapa de localização da estação maregráfica considerada.

Fonte: Autor (2024).

3.2 Variáveis do S6A e Leituras Maregráficas

A fim de, determinar a qualidade da ASM derivada das observações do S6A (séries altimétricas), essas foram comparadas com as leituras maregráficas, transformadas em ASM. Essas séries altimétricas foram obtidas por meio de um cadastro no Portal de Observação da Terra (do inglês, *Earth Observation Portal*), administrado pela EUMETSAT *data store*.

As variáveis do S6A e as leituras maregráficas foram obtidas em intervalos de tempo diferentes, variando em segundos ou minutos. Mas, foram selecionadas considerando o mesmo dia em que ambos foram obtidos. Com isso, toda a série temporal disponível pela EUMETSAT foi analisada neste trabalho. E as séries temporais (Radar e Encoder) das leituras maregráficas foram obtidas considerando as mesmas datas da série do S6A.

O intervalo de tempo em que os dados estavam disponíveis foi de 26 de dezembro de 2020 a 26 de abril de 2022. A resolução temporal do S6A de 9,92 dias ou 9 dias, 22 horas, 4 minutos e 48 segundos permitiu obter 56 datas com variáveis coletadas pelo satélite.

Para realizar o *download* dos dados da missão, o EUMETSAT *Data Store* foi escolhido no portal de observação da Terra. Após o cadastro no portal, os dados selecionados para o processamento foram os do Poseidon-4, nível 2, de alta resolução, linha base versão F06. Essa linha base é formada por um conjunto de variáveis que foram reprocessadas por meio de uma combinação de dados NRT/NTC.

Foi necessário indicar a localização do marégrafo para que o *Data Store* pudesse selecionar a trilha mais próxima. Devido ao lançamento recente do satélite S6A, houve poucas trilhas disponíveis no momento de *download* das variáveis.

A Figura 10 ilustra uma captura de tela do serviço de dados da EUMETSAT, mostrando a trilha mais próxima ou que contém a localização do marégrafo, juntamente com a data mais antiga disponível no mês escolhido, selecionado para o *download* das observações altimétricas. Após a seleção da trilha de interesse, o *download* dos dados foi iniciado e essas variáveis foram abertas no *software Panoply*.

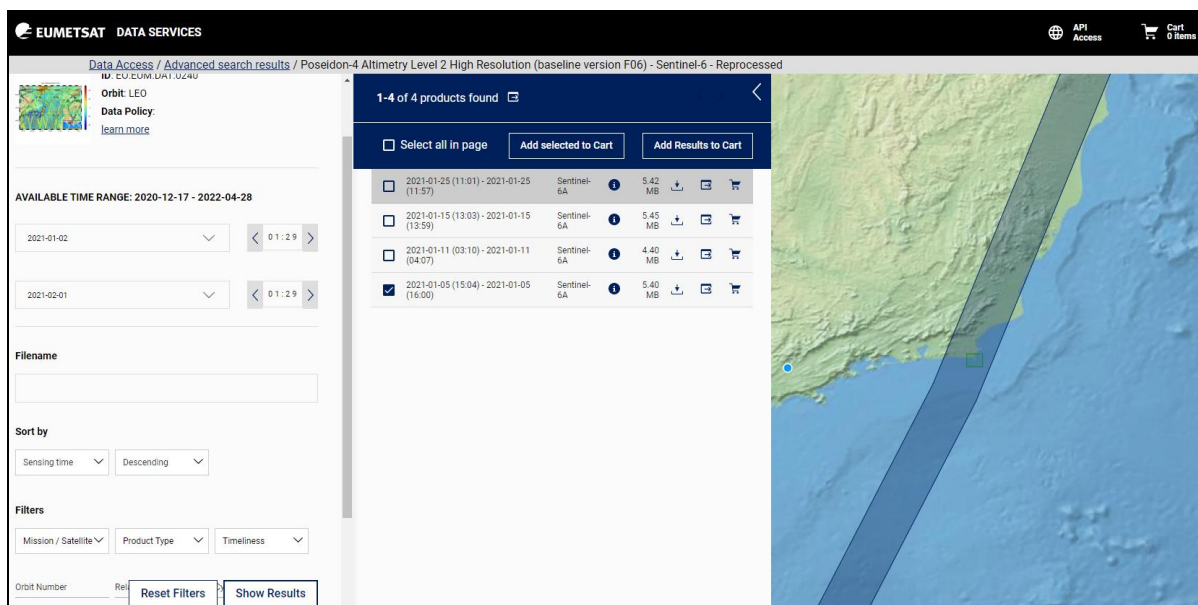


Figura 10 - Data services da EUMETSAT.

Fonte: Autor (2023).

Para a leitura das observações do S6A foi utilizado o *Panoply*. Esse *software* desenvolvido pela NASA permitiu criar gráficos de dados em formatos como: netCDF, HDF e GRIB. Além de, selecionar as variáveis de interesse.

As leituras maregráficas foram obtidas por meio do portal do IBGE, para os pontos pertencentes à RMPG. A administração desses dados foi realizada por meio de uma planilha eletrônica, gerenciada pelo Microsoft Excel.

As leituras maregráficas podem ser oriundas de 2 sensores digitais que compõem os marégrafos, são eles: Radar e Encoder. Cada sensor possui uma origem própria (zero) para as leituras. Por isso, a maioria das leituras maregráficas vinculadas a esses dois sensores apresentam quantidades distintas. Neste trabalho, ao citar as leituras maregráficas vinculadas ao zero do sensor de Radar, foi escrito leituras maregráficas de Radar. Já, as leituras maregráficas vinculadas ao zero do sensor de Encoder, foi escrito leituras maregráficas de Encoder.

Os horários de coleta das leituras maregráficas não correspondem aos horários de coleta do S6A. Para garantir a correspondência horária entre os dois equipamentos, foi realizada uma interpolação dessas leituras, tanto de Radar, quando de Encoder, utilizando o Polinômio Interpolador de Hermite. Para essa interpolação, foi utilizado um *script* no Octave (Apêndice I). O ArcGIS Pro foi utilizado para gerar os mapas, com uma licença de estudante.

3.3 Etapas da Coleta e Processamento de Dados

O fluxograma representado na Figura 11 ilustra as etapas que foram realizadas nesta pesquisa para alcançar os objetivos estabelecidos.

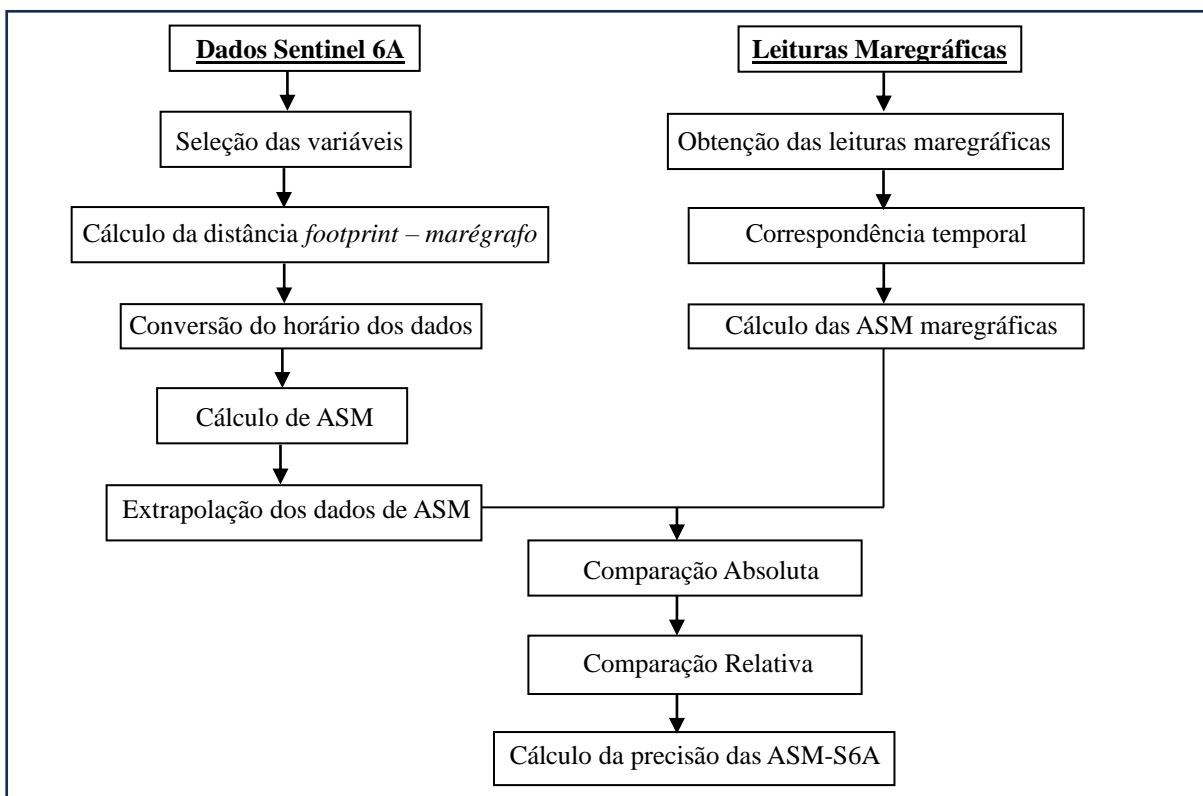


Figura 11 – Fluxograma.

Fonte: Autor (2024).

3.3.1 Seleção das variáveis

As variáveis de interesse foram aquelas que continham as observações altimétricas usadas para calcular a ASM. Essas variáveis foram as seguintes:

- a) "time": essa variável informa os segundos em *Universal Time Coordinate* (UTC) desde 1º de janeiro de 2000, às 00:00:00. O tempo é baseado no instante em que a forma de onda L1B toca a superfície;
- b) coordenadas geográficas: latitude e longitude que indicam o ponto em que o nadir do altímetro toca a superfície, seja terrestre ou oceânica (ponto de leitura do altímetro);
- c) "distance to the coast": distância entre o ponto de leitura do altímetro e a costa.
- d) "altitude": altitude do centro de massa do satélite acima do elipsoide de referência (WGS84);
- e) "range ocean": é a distância entre o altímetro e a superfície oceânica, incluindo todas as correções instrumentais;
- f) "ocean geocorrections": é a soma das correções meteorológicas e geofísicas a serem aplicadas a ASM sobre o oceano, como correção ionosférica do altímetro, correção troposférica seca do modelo em altitude zero, correção troposférica úmida do radiômetro, correção do viés do estado do mar, altura sólida da maré terrestre, efeitos de maré e correção da atmosfera dinâmica.
- g) "dac": é a combinação das flutuações de alta frequência da topografia da superfície do mar devido à pressão do ar de alta frequência e efeito do vento, e as alturas de baixa frequência do efeito do barômetro invertido.
- h) "internal tide": é a previsão da maré interna do modelo HRET, que inclui apenas os componentes harmônicos estáticos das ondas O1, K1, M2 e S2. Está incluído nas correções geofísicas.
- i) "inv_bar_cor": é calculado no "time tag" do altímetro, a partir da interpolação de 2 campos meteorológicos que o circundam. É fornecido como uma alternativa à correção atmosférica dinâmica (dac) e;
- j) "ocean_tide_sol2": esta solução corresponde ao modelo FES.

3.3.2 Cálculo da distância entre os *footprints* e o marégrafo

Para o recorte das observações altimétricas próximas ao marégrafo selecionado, fez-se necessário conhecer as coordenadas geográficas da localização do equipamento. A variável "coordenadas geográficas" do S6A foi selecionada e comparada com as coordenadas do marégrafo, isso para a localização da região de estudo. A variável "distance to the coast" foi escolhida para fazer a correspondência entre os dados do S6A selecionados anteriormente e a distância para a costa. Um recorte nos dados altimétricos de 100 km de distância da costa para o oceano foi considerado.

A partir disso, foi realizado o cálculo da distância entre os *footprints* e o marégrafo, em uma planilha eletrônica, para determinar quais pontos estavam a até 100 quilômetros de distância do marégrafo. Antes desse cálculo, foi preciso converter as coordenadas geográficas em coordenadas planas, uma vez que a planilha eletrônica não utiliza graus sexagesimais em seus cálculos.

As fórmulas apresentadas nas Equações 19, 20 e 21 foram utilizadas para converter as coordenadas geográficas em coordenadas planas, baseando-se na fórmula do comprimento do

arco de uma elipse. Já a Equação 22 permitiu calcular a distância entre os pontos de leitura do altímetro (coordenadas planas) e o marégrafo (coordenadas planas) (MELO, 2018).

$$\text{Raio médio de curvatura} = \sqrt[3]{N * M} \quad (19)$$

$$X(m) = \text{latitude}_{\text{radiano}} * \text{Raio médio de curvatura} \quad (20)$$

$$Y(m) = \text{longitude}_{\text{radiano}} * \text{Raio médio de curvatura} \quad (21)$$

$$\text{Distância (m)} = \sqrt[2]{[(X_{\text{alt}} - X_{\text{mar}})^2] + [(Y_{\text{alt}} - Y_{\text{mar}})^2]} \quad (22)$$

Em que: N é o valor do raio de curvatura da seção primeiro vertical; M é o valor do raio de curvatura da seção meridiana; X_{alt} é o valor da coordenada X plana, em metros, do *footprint*; Y_{alt} é o valor da coordenada Y plana, em metros, do *footprint*; X_{mar} é o valor da coordenada X plana, em metros, do marégrafo; Y_{mar} é o valor da coordenada Y plana, em metros, do marégrafo.

O banco de dados da EUMETSAT disponibiliza as variáveis do S6A em duas frequências: 1 hertz e 20 hertz. Foi realizada uma análise para verificar a distância entre os *footprints*, a fim de determinar qual a frequência a ser adotada. Foi escolhida a frequência que apresentou a menor distância entre os *footprints* do satélite, pois as variações do nível do mar podem ser significativas em grandes distâncias. A frequência escolhida foi a de 20 hertz, pois, por ser a maior frequência gerou mais dados, como consequência, esses são mais próximos.

3.3.3 Conversão do horário dos dados do Sentinel-6A

O tempo considerado pelo S6A foi o Tempo Universal Coordenado (do inglês, *Coordinated Universal Time* - UTC). A contagem desse tempo foi considerando apenas os segundos, desde 1º de janeiro de 2000 às 00h00m00s. Na trilha aberta no *Panoply*, foi possível encontrar a variável "time" que indica os valores do tempo em UTC.

Considerando a data de início da contagem até o dia em que o dado altimétrico foi coletado tem-se a quantidade de dias. Esses dias serão convertidos em horas, em seguida em minutos e segundos e são denominados de segundos/dia (SD). Os valores de SD foram subtraídos dos valores da variável time, correspondente a posição em que cada *footprint* do S6A foi obtido. O resultado será denominado de Tempo Atual (TA).

Os TA estavam em segundos e foram transformados em horas, minutos e segundos no padrão UTC. Posteriormente, foram convertidos para o UTC correspondente ao marégrafo. A justificativa dessa conversão estava baseada na necessidade de padronizar os dados do S6A e do marégrafo quanto ao tempo e a forma de registrar o dia e a hora da coleta do dado.

3.3.4 Cálculo de ASM oriunda das variáveis do Sentinel-6A

Para obter os valores de ASM, considerando a posição central de cada *footprint*, foi calculado inicialmente o valor da variável "ocean geocorrections", sem considerar as correções de maré e do barômetro. Isso, porque as leituras maregráficas não são corrigidas dessas mesmas componentes. A Equação 23 ilustra como obter o valor de ASM, sem as correções de maré e do barômetro.

$$ASM = h - (a + OGC_A) \quad (23)$$

Em que: h é o valor da altitude geométrica, fornecido pela variável *altitude*; a é o valor do *range* fornecido pela variável *range_ocean*; e OGC_A é o valor das correções sem considerar as correções de maré e do barômetro.

3.3.5 Extrapolação dos dados ASM Sentinel-6A

O *footprint* do S6A não coincide com a posição do marégrafo em nenhuma parte da trilha. Por causa disso, fez-se necessário a extrapolação da série temporal do S6A. Essa extrapolação foi realizada considerando as diferenças de altitude geoidal e da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), ambos, entre a posição do marégrafo e a posição central do *footprint*. A Equação 24 ilustra como a extrapolação da série temporal foi realizada (LIEBSCH et al., 2002):

$$ASM_{S6A-MA} = ASM-S6A - dN - dh_{TNMM} \quad (24)$$

Em que: ASM_{S6A-MA} é o valor de ASM-S6A extrapolada até o marégrafo; dN são as diferenças da altitude geoidal e dh_{TNMM} são as diferenças entre valores da Topografia do Nível Médio do Mar.

Os valores das diferenças de altitude geoidal deveriam ser obtidos por meio de modelos geoidais regionais precisos, mas não há disponibilidade destes modelos nas áreas de estudo. Então, segundo Giehl, Dalazoana e Santana (2022), uma saída para essa indisponibilidade seria a utilização de Modelos Globais do Geopotencial (MGG). O modelo adotado foi o MGG XGM2019e_2159, no sistema de maré média.

O serviço de cálculo do *International Center for Global Gravity Field Models* (ICGEM) foi utilizado para a obtenção dos dados do MGG. A opção *user-defined points* foi considerada para tal objetivo, em que as coordenadas dos marégrafos e do ponto central de cada célula foram usadas (GIEHL, DALAZOANA E SANTANA, 2022; ICGEM, 2023).

Os dados de TNMM foram obtidos por meio de um modelo global denominado CNES-CLS18. Este modelo foi desenvolvido considerando dados advindos de medições oceanográficas, altimetria por satélites e campo de gravidade oriundo das missões GRACE e GOCE. No site da *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data* (AVISO), o modelo global de Topografia Dinâmica Média (do inglês, *Mean Dynamic Topography* – MDT), denominado CNES-CLS18, foi considerado para obter os valores de TNMM na posição dos marégrafos e pontos centrais das células (GIEHL, DALAZOANA E SANTANA, 2022; AVISO, 2023).

A escolha do MGG XGM2019e_2159 e do MDT CNES-CLS18 deu-se para seguir a metodologia de Giehl, Dalazoana e Santana (2022). Mas, existem modelos mais atuais e precisos que podem ser utilizados nesse processo de extrapolação, ao qual não foram escolhidos na época, pois no momento do processamento dos dados, os modelos selecionados eram os que estavam disponíveis.

3.3.6 Obtenção das leituras maregráficas

As leituras maregráficas foram obtidas por meio do site do IBGE. É importante ressaltar que, a mesma data escolhida para calcular o valor de ASM, oriundo do S6A, foi selecionada para analisar as leituras maregráficas.

Após o *download* das leituras maregráficas, foi realizado um recorte quanto ao instante de tempo em que o altímetro obteve os dados altimétricos. Esse recorte foi necessário, pois as leituras maregráficas possuem um intervalo de gravação em minutos, durante as 24 horas do dia. Já as variáveis do S6A foram obtidas com intervalo de gravação em segundos, durante a passagem do satélite pela posição do marégrafo.

3.3.7 Correspondência temporal

Cada marégrafo pode ser composto por um conjunto de sensores, que podem ser digitais ou analógicos. Dois sensores digitais considerados foram o Radar e o Encoder. O intervalo de tempo em que cada sensor coleta as leituras maregráficas foi diferente entre eles e entre o Sentinel-6A. Como as comparações foram efetuadas entre as leituras maregráficas transformadas em ASM e as ASM obtidas por meio do S6A, fez-se necessário uniformizar esses instantes de tempo para uma perfeita comparação.

No caso, como as horas e os minutos foram iguais entre as leituras maregráficas e as variáveis do S6A, os segundos em que os dados altimétricos foram obtidos são transformados em minutos, considerando 4 casas decimais. Para a correspondência temporal entre as variáveis do S6A e para as leituras maregráficas utilizou-se o Polinômio Interpolador de Hermite de 2º grau (MELO; OLIVEIRA, 2019). A Equação 25 ilustra a forma geral deste polinômio.

$$P(x) = a_1 + a_2 * x + a_3 * x^2 \quad (25)$$

Em que: $P(x)$ é o valor da leitura maregráfica associado ao mesmo instante em que a variável do S6A foi obtida; a_1 ; a_2 e a_3 são os coeficientes do polinômio que foram calculados com o *script* no Octave (Apêndice I) e x são os instantes de tempo da variável do S6A, descontadas as horas inteiras e o resultado transformado para minutos.

Os coeficientes do Polinômio Interpolador de Hermite foram calculados por meio de um *script* no *software* Octave. A ideia central desse *script* foi, primeiramente, construir uma lei de formação que modele os dados e verifique os erros cometidos. Essa modelagem foi realizada considerando um sistema de equações lineares. Ao obter a lei de formação, essa ainda não foi considerada um Polinômio Interpolador de Hermite. A matriz de Vandermonde foi utilizada para encontrar os coeficientes do Polinômio Interpolador de Hermite, em que o vetor das observações foi formado pelos valores da função formada pela interpolação do parágrafo anterior e os valores da derivada primeira dessa função.

3.3.8 Cálculo das ASM maregráficas

As leituras maregráficas estavam referenciadas ao zero do sensor ao qual elas estão associadas. Para realizar as análises comparativas, essas leituras devem ser transformadas para ASM, considerando a mesma referência geodésica utilizada para calcular a ASM oriunda das variáveis do S6A. Para isso foram utilizadas as Equações 26 e 27, que representam a equação fundamental de transformação do referencial. A Figura 12 ilustra a correlação entre os níveis de referência maregráfica e algumas variáveis relacionadas à ALTSAT (IBGE, 2016).

$$ASM_{\text{mareógrafo}} = L_{\text{maregráfica}} - S \quad (26)$$

$$S = A + B + C + J - T \quad (27)$$

Em que: $ASM_{\text{mareógrafo}}$ (SSH_{TG}) é a altitude observada do NMM em relação ao seu elipsoide de referência; $L_{\text{maregráfica}}$ é a altura observada do NMM em relação ao zero do sensor; A é o desnível entre os zeros do mareógrafo e dos sensores; B é a leitura nominal do pino da régua; C é o desnível entre o pino da régua e a referência de nível; J é a estabilidade das RRNN (Referências de Nível) da estação; T é a altitude elipsoidal da RN vizinha.

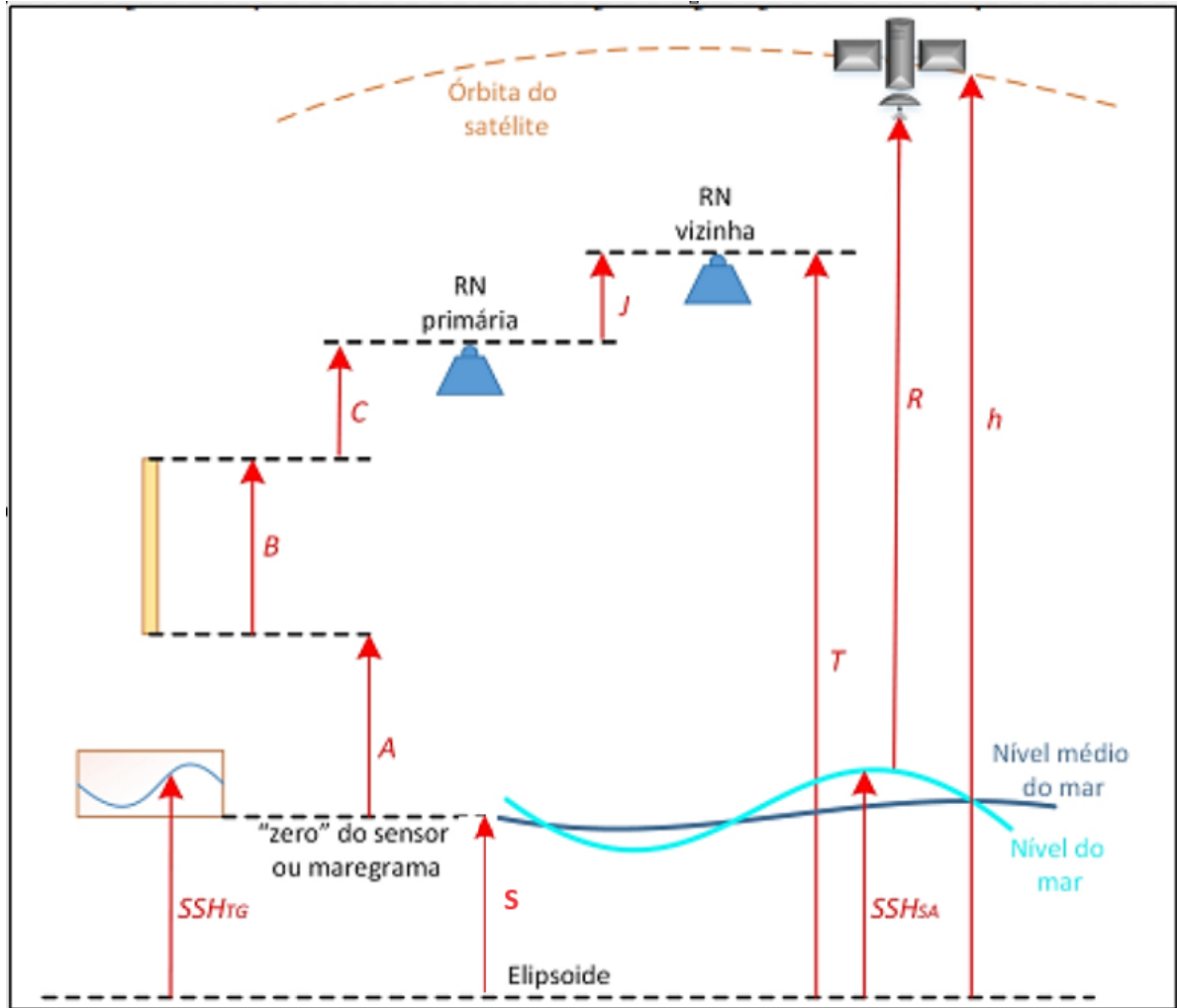


Figura 12 - Correlação entre os níveis de referência maregráfica e algumas variáveis relacionadas à altimetria por satélite.

Fonte: Adaptado de IBGE (2016) e Lu, Qu e Qiao (2014).

3.3.9 Comparação absoluta

Na comparação absoluta, os dados foram considerados em uma mesma referência geodésica. Com o conjunto de ASM oriundas das leituras maregráficas e o outro conjunto de ASM oriundas do S6A, ambos elementos desses conjuntos relacionados no mesmo instante de tempo e ponto amostral, foi feita uma comparação direta entre esses conjuntos de ASM.

O resultado dessa comparação fornece um conjunto de diferenças, a partir do qual foram calculadas as médias, desvios-padrão e coeficientes de correlação. A célula que apresentou o maior coeficiente de correlação entre os elementos desses conjuntos de ASM, a menor média e desvio-padrão e estiver mais próxima do marégrafo foi selecionada para análise e conclusões quanto à qualidade dos dados altimétricos do Sentinel-6A.

3.3.10 Comparação relativa

Na comparação relativa, as ASM-S6A foram comparadas entre si, considerando cada série temporal individualmente. As séries temporais foram agrupadas conforme a distância do *footprint* ao marégrafo. Ou seja, em cada data que o satélite coletou as variáveis, existe um *footprint* que estava a uma determinada distância do marégrafo. Como essas distâncias não são iguais entre as datas, mas a diferença variou em até um quilômetro, esses *footprints* foram agrupados para a análise. Isso formou uma série temporal que continha um determinado conjunto de *footprints*. As séries temporais possuíam todas as ASM-S6A extrapoladas para as datas em que o S6A coletou as variáveis. As diferenças entre os valores de ASM-S6A extrapoladas para cada série temporal foram obtidas pela Equação 28.

$$D = ASM(S6A)_{DANT} - ASM(S6A)_D \quad (28)$$

Em que: D é a diferença entre as ASM-S6A extrapoladas entre duas datas em uma mesma série temporal; $ASM(S6A)_{DANT}$ é o valor da ASM-S6A extrapolada para um dia anterior ao considerado e $ASM(S6A)_D$ é o valor da ASM-S6A extrapolada para o dia considerado.

Como cada *footprint* gerado pelo S6A possui uma data e horário de coleta das variáveis, as leituras maregráficas precisaram ser coletadas com a mesma data e horário que cada *footprint*. Após a interpolação de Hermite, as leituras maregráficas passaram a ter uma correspondência com os *footprints*. E então, as ASM-MAR foram calculadas e agrupadas em séries temporais de acordo com o horário e a data de coleta dos *footprints*.

As diferenças entre as ASM-MAR, para cada série temporal, foram calculadas considerando a Equação 29.

$$D = ASM(MAR)_{DANT} - ASM(MAR)_D \quad (29)$$

Em que: D é a diferença entre as ASM-MAR entre duas datas em uma mesma série temporal; $ASM(MAR)_{DANT}$ é o valor da ASM-MAR para um dia anterior ao considerado e $ASM(MAR)_D$ é o valor da ASM-MAR para o dia considerado.

Dois conjuntos foram formados, um conjunto com as diferenças entre as ASM-MAR e outro conjunto com as diferenças entre as ASM-S6A. Cada diferença está correlacionada pela data e horário. Ou seja, cada diferença está ligada pela série temporal, que foi codificada de 1 até 312. A comparação relativa foi realizada comparando os dois conjuntos de diferenças, de acordo com o número da série temporal e o intervalo de dias considerados.

A média e o desvio-padrão foram calculados considerando o resultado da comparação relativa, para cada série temporal. Já o cálculo para a determinação do coeficiente de correlação de Pearson considerou cada conjunto de diferenças de ASM-S6A e de ASM-MAR como uma variável.

3.3.11 Cálculo da precisão das ASM-S6A

Após a escolha da série temporal, a precisão da ASM-S6A foi associada a precisão da série temporal escolhida.

3.4 Determinação da Altitude da Superfície do Mar por Meio de Observações do Sentinel-6A na Região da Terra do Fogo – Argentina

A Terra do Fogo, na República Argentina, é uma província que pertence a Patagônia argentina e é a região situada no extremo sul desse país. É composta pelas ilhas dos Estados, ilha grande da Terra do Fogo, que divide a fronteira com o Chile, ilhas pequenas e territórios que a Argentina reclama no Atlântico Sul, como parte da Antártida. O tamanho dessa província é de 1.002.445 km² (CORONATO et al., 2008; COSTA, 2020).

Alguns trabalhos baseados em altimetria por satélites (CHEN et al., 2017; DIENG et al., 2017) relataram que o Nível Médio Global do Mar (NMGM) tem aumentado desde 1993. O derretimento do gelo polar tem influenciado nessa elevação do NMGM, nas duas últimas décadas. No entanto, segundo Dangendorf et al. (2019), esse aumento detectado por esses estudos é consistente com as estimativas, independente das contribuições em massa da Groelândia e da Antártica nas duas últimas décadas.

Esse estudo é importante pois a região da Ilha Grande da Terra do Fogo é uma região importante economicamente para a República Argentina, visto que, possui uma zona franca semelhante a zona franca de Manaus (COSTA, 2020). Um aumento do NMM nessa região causará impactos financeiros e humanos inestimáveis. Pois, a salinização de rios e inundação de áreas urbanas impactará tanto a agricultura, quanto a economia das cidades pertencentes a essa ilha. E a forma como a variação do NMM tem sido divulgada causa uma impressão de que essa variação é homogênea por todo o globo terrestre. Então faz-se necessária a avaliação dessa homogeneidade da variação do NMM.

3.4.1 Delimitação da área de estudo

A área de estudo compreendeu a costa da Ilha Grande da Terra do Fogo. Pois a trilha que contém as observações referentes a área do marégrafo de Arraial do Cabo – RJ é a mesma da região argentina. A Figura 13 ilustra a região de estudo com um dos *footprints* recortados para posterior análise dos dados altimétricos. A Figura 14 ilustra a trilha utilizada para análise das observações.

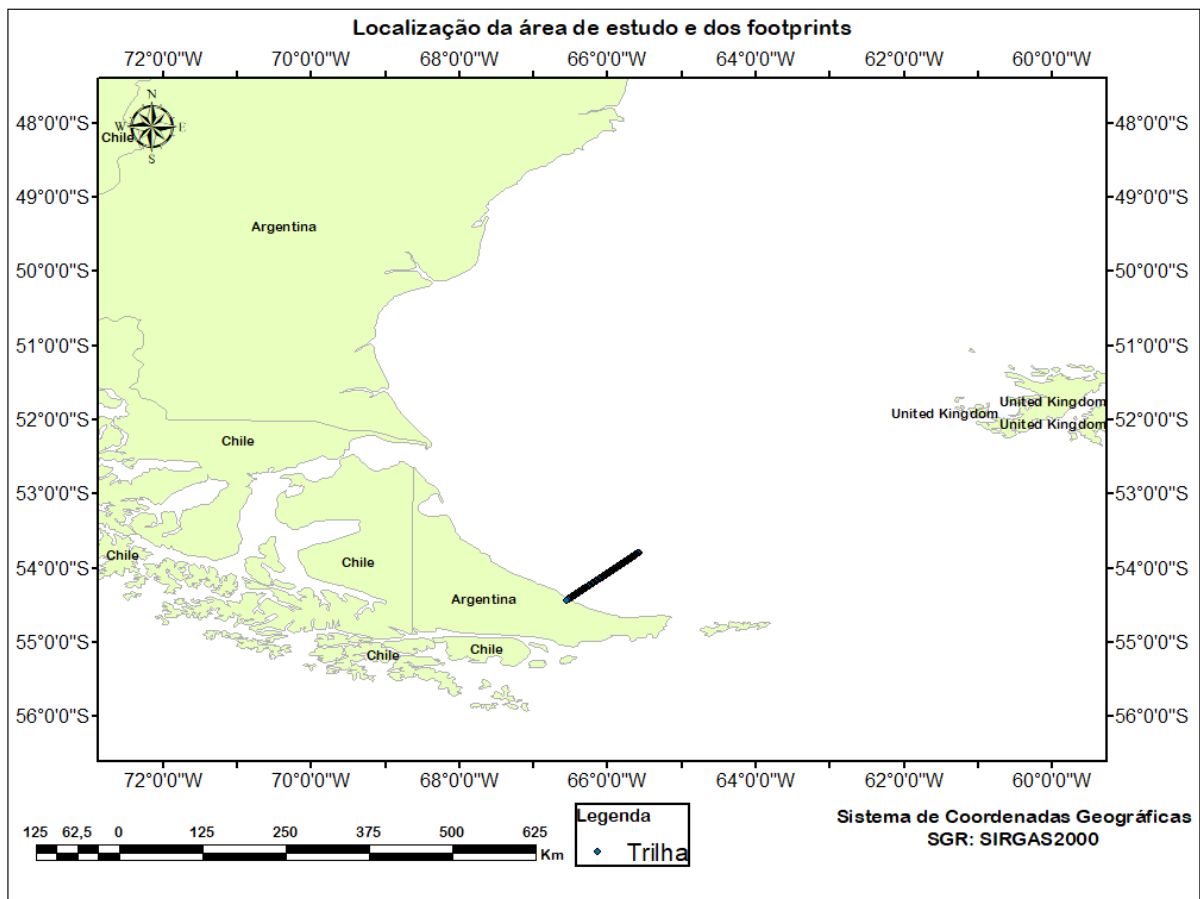


Figura 13 - Mapa de localização da área de estudos e dos *footprints*.

Fonte: Autor (2024).

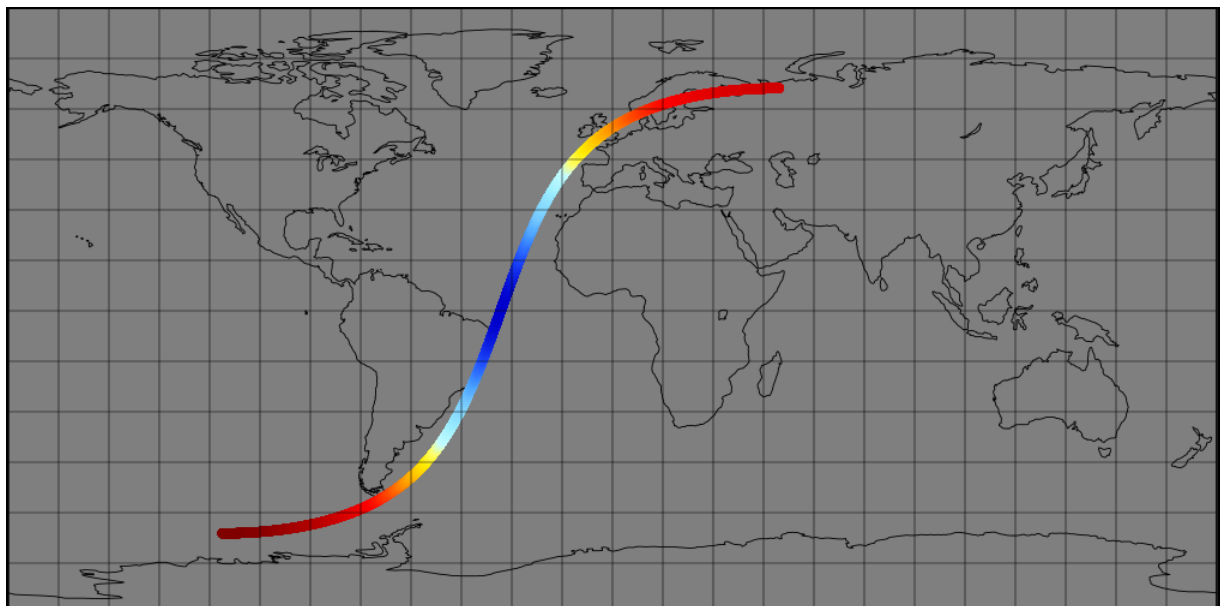


Figura 14 – Representação da trilha utilizada no *software Panoply*.

Fonte: Autor (2024).

3.4.2 Determinação das ASM

Para a determinação das ASM na região da Terra do Fogo, as variáveis do S6A foram obtidas por meio de um cadastro no Portal de Observação da Terra (do inglês, *Earth Observation Portal*), administrado pela EUMETSAT *data store*. Para a leitura das observações do S6A e seleção das variáveis é utilizado o *Panoply*. Esse *software* desenvolvido pela NASA permite ao usuário criar gráficos de dados em formatos como netCDF, HDF e GRIB. Além de, selecionar as variáveis de interesse. O cálculo dos valores de ASM e a definição das séries temporais foram realizados em uma planilha eletrônica.

3.4.3 Etapas da coleta e processamento de dados

O fluxograma representado na Figura 15 ilustra as tarefas que foram realizadas nesta parte da pesquisa para alcançar os objetivos estabelecidos.

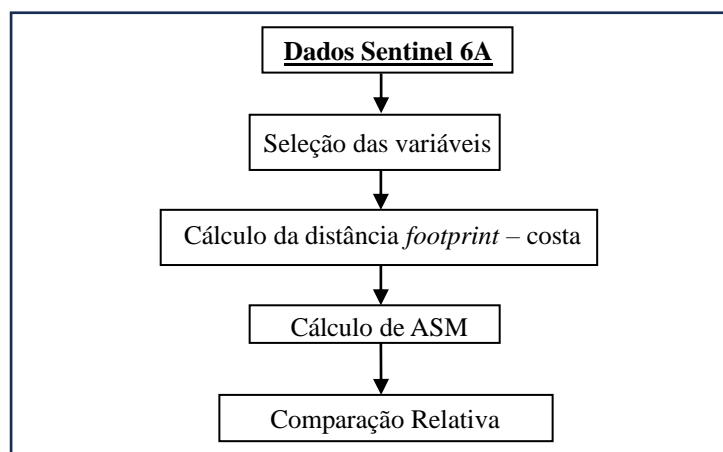


Figura 15 - Fluxograma.

Fonte: Autor (2024).

3.4.4 Obtenção dos dados do Sentinel-6A

As variáveis do S6A foram obtidas considerando toda a série temporal disponível pela EUMETSAT. O intervalo de tempo em que os dados foram disponibilizados foi de 26 de dezembro de 2020 a 26 de abril de 2022. A resolução temporal do S6A de 9,92 dias ou 9 dias, 22 horas, 4 minutos e 48 segundos permitiu obter 56 datas com variáveis coletadas pelo satélite.

Para realizar o *download* dos dados da missão, o EUMETSAT *Data Store* foi escolhido no portal de observação da Terra. Após o cadastro no portal, os dados selecionados para o processamento foram os do Poseidon-4, nível 2, de alta resolução, linha base versão F06. A trilha utilizada foi a mesma que continha a região de Arraial do Cabo. As variáveis oriundas do S6A foram obtidas e abertas no *software Panoply*.

3.4.5 Seleção das variáveis

As variáveis de interesse foram aquelas que continham as observações altimétricas usadas para calcular a ASM. Essas variáveis são as seguintes:

- a) "distance to the coast": distância entre o ponto de leitura do altímetro e a costa;
- b) "altitude": altitude do centro de massa do satélite acima do elipsoide de referência (WGS84);
- c) "range ocean": é a distância entre o altímetro e a superfície oceânica, incluindo todas as correções instrumentais;
- d) "ocean geocorrections": é a soma das correções meteorológicas e geofísicas a serem aplicadas a ASM sobre o oceano, como correção ionosférica do altímetro, correção troposférica seca do modelo em altitude zero, correção troposférica úmida do radiômetro, correção do viés do estado do mar, altura sólida da maré terrestre, solução geocêntrica da altura da maré oceânica, altura da maré oceânica geocêntrica, efeitos de maré, altura geocêntrica da maré polar e correção da atmosfera dinâmica.

3.4.6 Cálculo da distância entre os *footprints* e a costa

A determinação da distância entre os *footprints* e a costa foi coletada da variável *distance to the cost*. Com isso, no próprio *Panoply*, os *footprints* foram selecionados até uma distância de 100 km da costa e o número que o banco de dados fornece para cada um foi copiado para a planilha eletrônica.

3.4.7 Cálculo de ASM oriunda das variáveis do Sentinel-6A

Para obter os valores de ASM, considerando a posição central de cada *footprint*, foi considerando todas as correções e calibrações. A Equação 30 ilustra como obter o valor de ASM.

$$ASM = h - (a + OGC_A) \quad (30)$$

Em que: h é o valor da altitude geométrica do satélite, fornecido pela variável *altitude*; a é o valor do *range* fornecido pela variável *range_ocean*; e OGC_A é o valor das correções da variável *ocean geo corrections*.

3.4.8 Comparação relativa

Na comparação relativa, as ASM-S6A foram comparadas entre si, considerando cada série temporal individualmente. As séries temporais foram agrupadas conforme a distância do *footprint* ao marégrafo. As séries temporais possuíam todas as ASM-S6A para as datas em que o S6A coletou as variáveis. As diferenças entre os valores de ASM-S6A para cada série temporal foram obtidas pela Equação 31. Com as diferenças calculadas, a média e o desvio-padrão foram obtidos para determinar a variação temporal da ASM, na região.

$$D = ASM(S6A)_{DANT} - ASM(S6A)_D \quad (31)$$

Em que: D é a diferença entre as ASM-S6A entre duas datas em uma mesma série temporal; $ASM(S6A)_{DANT}$ é o valor da ASM-S6A para um dia anterior ao considerado e $ASM(S6A)_D$ é o valor da ASM-S6A para o dia considerado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados para a Região de Arraial do Cabo – Brasil

A Tabela 4 apresenta amostra de um conjunto de séries temporais e as distâncias até o marégrafo que cada uma possui. Ao analisar a Tabela 4 percebe-se que os *footprints* mais próximos do marégrafo de Arraial do Cabo foram os das últimas séries temporais. A última série temporal (312, na tabela) estava aproximadamente 11 km de distância do marégrafo escolhido. Isso aconteceu pois, apesar da trilha do S6A “passar” pela área onde o marégrafo está localizado, nenhum *footprint* possui as coordenadas do mesmo.

Tabela 4 – Valores das distâncias das séries temporais (1 a 5 e 308 a 312) até o marégrafo de Arraial do Cabo.

Série Temporal	26/12/2020	05/01/2021	15/01/2021	25/01/2021	04/02/2021
	(km)	(km)	(km)	(km)	(km)
1	100,303	100,114	100,268	100,166	100,295
2	99,993	99,805	99,959	99,856	99,985
3	99,684	99,495	99,649	99,547	99,676
4	99,374	99,186	99,340	99,237	99,366
5	99,065	98,876	99,030	98,928	99,057
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
308	12,160	12,110	12,151	12,129	12,178
309	12,060	12,015	12,053	12,033	12,078
310	11,968	11,928	11,961	11,944	11,987
311	11,883	11,847	11,877	11,863	11,902
312	11,805	11,775	11,800	11,789	11,825

Fonte: Autor (2024).

Com as ASM-S6A calculadas, percebeu-se que todos os valores foram negativos. Ou seja, a superfície do mar estava abaixo do elipsoide de referência. Conforme nos afastamos da costa, a diferença entre o elipsoide de revolução e a superfície do mar foi aumentando, em valores absolutos, para essa região analisada.

Foi realizado um recorte nas leituras maregráficas para o intervalo de horário correspondente ao dos dados altimétricos (ASM-S6A). Em seguida, foi realizada a conversão das leituras maregráficas em ASM-MAR. Essas leituras estavam referenciadas ao zero do sensor (Radar ou Encoder) e foram vinculadas ao elipsoide de revolução do SIRGAS2000, que na prática é equivalente ao elipsoide do WGS84.

A forma do polinômio interpolador que melhor adequa os valores de ASM-MAR foi determinado pelo cálculo dos coeficientes por meio da resolução da matriz de Vandermonde (Apêndice I). Em alguns casos, essa apresentou um polinômio de Hermite de 1º grau, diferente das outras equações que apresentaram polinômios de 2º grau. Isso não tem uma relação direta com as leituras ou com as variáveis do S6A. Apenas, a melhor forma que o interpolador encontrou para modelar os dados.

Ao realizar a validação do polinômio de Hermite gerado após a interpolação, os pontos de verificação foram inseridos no polinômio e o resultado comparado com os valores registrados pelos marégrafos. A ordem do erro foi de -10^{15} , aproximadamente. Com isso, a forma do polinômio escolhida (polinômio completo de 2º grau) conseguiu interpolar as ASM-MAR para os mesmos instantes de tempo das ASM-S6A.

As ASM-S6A foram extrapoladas para a localização do marégrafo. Isso para uma efetiva avaliação da qualidade. Na comparação absoluta, as diferenças entre o ASM-S6A e o ASM-MAR foram calculadas em valores absolutos. Em seguida, a média (Figura 16) e o desvio-padrão (Figura 17) foram calculados. Bem como, o coeficiente de correlação de Pearson (Figura 18).

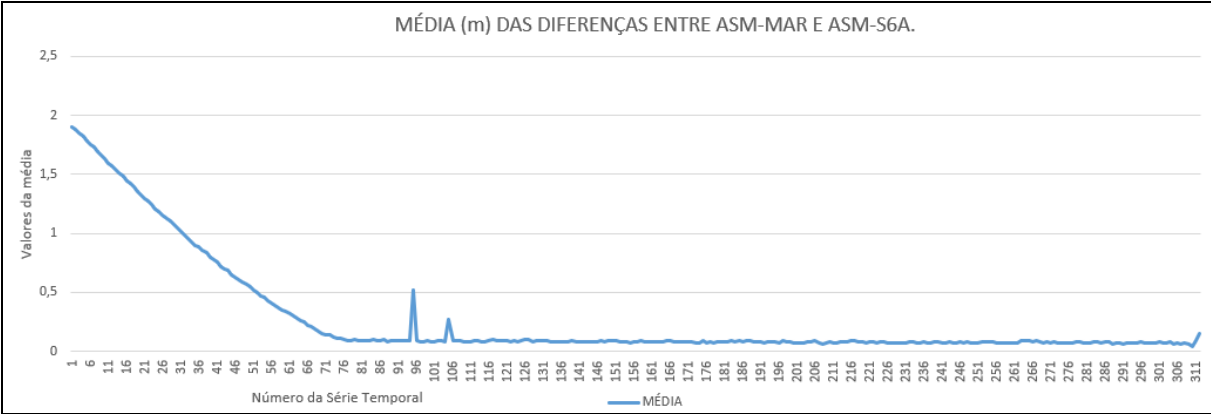


Figura 16 – Gráfico dos valores da média das diferenças entre ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo.

Fonte: Autor (2024).

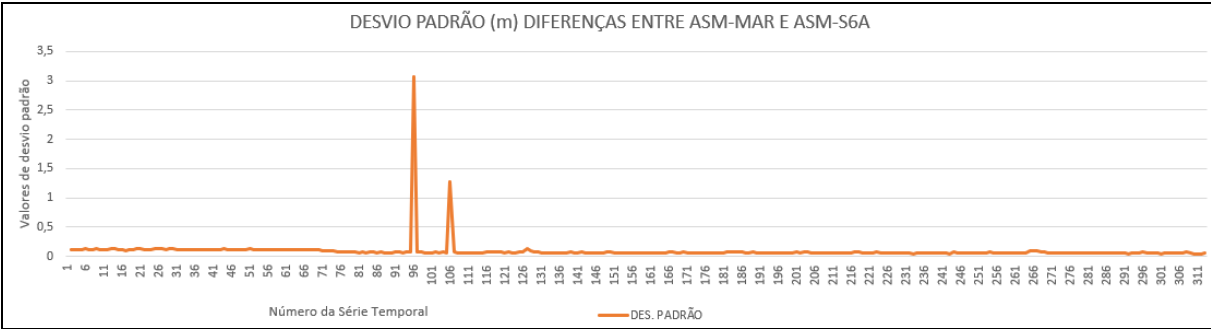


Figura 17 – Gráfico dos valores do desvio-padrão das diferenças entre ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo.

Fonte: Autor (2024).

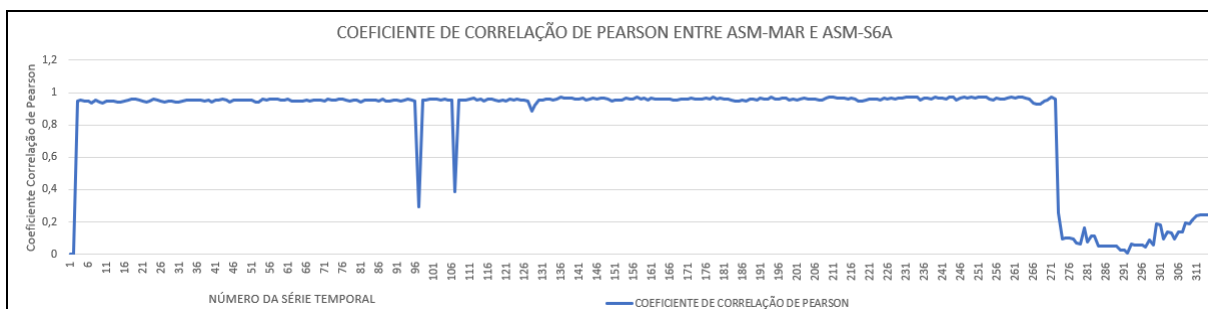


Figura 18 – Gráfico dos valores do coeficiente de correlação de Pearson entre as ASM-MAR e ASM-S6A em Arraial do Cabo.

Fonte: Autor (2024).

Ao observar as Figuras 16, 17 e 18, ambos os gráficos mostram a presença de *outliers* nas séries 96 e 106. Esses *outliers* foram detectados na variável *range*. E o motivo para a origem deles pode ter sido algum erro no banco de dados ou algum efeito na própria variável. O gráfico ilustrado pela Figura 18 possui duas quedas acentuadas, uma na primeira série e outra nas últimas séries. Isso ocorreu devido a falta de disponibilização dos dados da variável *oceanogeocorrections*. Essa variável sofre influência da baixa profundidade do oceano próximo a costa e por isso os valores não são disponibilizados pelo banco de dados.

As séries que apresentaram os valores de acordo com os critérios de: menor média e desvio padrão, em comparação com todas as outras calculadas, e maior Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP), em comparação com todos os outros calculados, foram: 208, 249, 260 e 261, considerando as leituras maregráficas oriundas do zero do sensor Radar maregráfico. A Tabela 5 ilustra os valores de média, desvio-padrão e CCP, bem como, a distância ao marégrafo das séries selecionadas.

Tabela 5: Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação absoluta (sensor Radar maregráfico).

Número da Série Temporal	Média (m)	Desvio Padrão (m)	CCP	Distância ao marégrafo (Km)
208	0,0653	0,0552	0,9744	36,9047
249	0,0682	0,0529	0,9748	25,0870
260	0,0676	0,0518	0,9724	22,0966
261	0,0710	0,0527	0,9750	21,8311

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 5 demonstra-se que o maior CCP é a série temporal 261, que também é a mais próxima do marégrafo de Arraial do Cabo. Mas, a série temporal 261 não é a que apresentou a menor média e desvio padrão. A série que apresentou a menor média aritmética das diferenças foi a 208 e a série que apresentou o menor desvio padrão foi a 260.

Ainda na comparação absoluta, considerando-se as leituras maregráficas oriundas do zero do sensor Encoder. As médias, os desvios padrão e os CCP apresentaram valores próximos dos calculados para as leituras maregráficas de Radar. Portanto, os gráficos dessas variáveis estatísticas foram muito próximo ao apresentado pelas Figuras 16, 17 e 18.

As séries temporais que apresentaram os valores ideais, de acordo com os mesmos critérios anteriores foram as mesmas apresentadas pela Tabela 5. A Tabela 6 ilustra os valores de média, desvio-padrão e CCP, bem como, a distância ao marégrafo das séries selecionadas.

Tabela 6: Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação absoluta (sensor Encoder mareográfico).

Número da Série Temporal	Média (m)	Desvio Padrão (m)	CCP	Distância ao marégrafo (Km)
208	0,0671	0,0573	0,9751	36,9047
249	0,0680	0,0532	0,9751	25,0870
260	0,0657	0,0533	0,9722	22,0966
261	0,0693	0,0545	0,9742	21,8311

Fonte: Autor (2024)

Ao observar-se a Tabela 6, percebe-se que a série temporal com menor média e desvio padrão e maior CCP foram diferentes. Enquanto na comparação absoluta com leituras de Radar, a série com menor média foi a 208, considerando as leituras mareográficas de Encoder, a série com menor média foi a 260. Já, a série temporal com menor desvio padrão, para leituras de Radar foi a 260, e para leituras de Encoder foi a 249. A série temporal que apresentou o maior CCP, na tabela 5 foi a 261, já na tabela 6, foram as 208 e 249. A análise desses parâmetros estatísticos foi importante para a definição de qual série temporal que apresentou os valores de ASM mais próximos do estado do mar na posição do marégrafo de Arraial do Cabo. A discussão desses resultados foi realizada na seção 6.2.

Para a comparação relativa, as séries que apresentaram os valores ideais, de acordo com os critérios de: menor média e desvio padrão, em comparação com todas as outras calculadas, e maior Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP), em comparação com todos os outros calculados, foram: 208, 249, 260 e 261. A Tabela 7 ilustra os valores de média, desvio-padrão e CCP, bem como, a distância ao marégrafo das séries selecionadas. Diferentemente do que foi avaliado pelas Tabelas 5 e 6, a série temporal que apresentou o maior CCP, a menor média e desvio padrão foi a 208.

Tabela 7: Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação relativa (sensor Radar mareográfico).

Número da Série Temporal	Média (m)	Desvio Padrão (m)	CCP	Distância ao marégrafo (Km)
208	0,0809	0,0577	0,8806	36,9047
249	0,0822	0,0687	0,8638	25,0870
260	0,0821	0,0682	0,8678	22,0966
261	0,0887	0,0784	0,8315	21,8311

Fonte: Autor (2024)

Diferentemente das comparações anteriores, as séries que apresentaram os menores valores para média e desvio padrão e os maiores valores para o CCP, foram: 208, 209, 248 e 249. A Tabela 8 ilustra os valores de média, desvio-padrão e CCP, bem como, a distância ao marégrafo das séries selecionadas. A série temporal que apresentou o maior CCP, a menor média e desvio padrão foi a 208.

Tabela 8: Valores de média, desvio-padrão e CCP, para as séries temporais selecionadas pela comparação relativa (sensor Encoder mareográfico).

Número da Série Temporal	Média (m)	Desvio Padrão (m)	CCP	Distância ao marégrafo (Km)
208	0,0812	0,0621	0,8776	36,9047
209	0,0860	0,0600	0,8723	36,6089
248	0,0858	0,0807	0,8661	25,3643
249	0,0904	0,0774	0,8631	25,0870

Fonte: Autor (2024)

Enquanto, na comparação absoluta houve uma variação de qual série apresentou os melhores resultados, de acordo com os critérios elencados, na comparação relativa, a série que apresentou os melhores resultados foi a de número 208, que está a 36,9047 km de distância do marégrafo. No geral, as séries 208 e 249 foram as que atenderam os critérios de escolha, com isso, essas séries foram representadas em um gráfico, juntamente com as séries de ASM-MAR. A Figura 19 ilustra o gráfico com as séries temporais de ASM de número 208 e 249, comparadas as ASM-MAR. Apenas foi ilustrado o gráfico considerando as ASM-MAR (Radar), pois os dados possuem valores muito próximos.

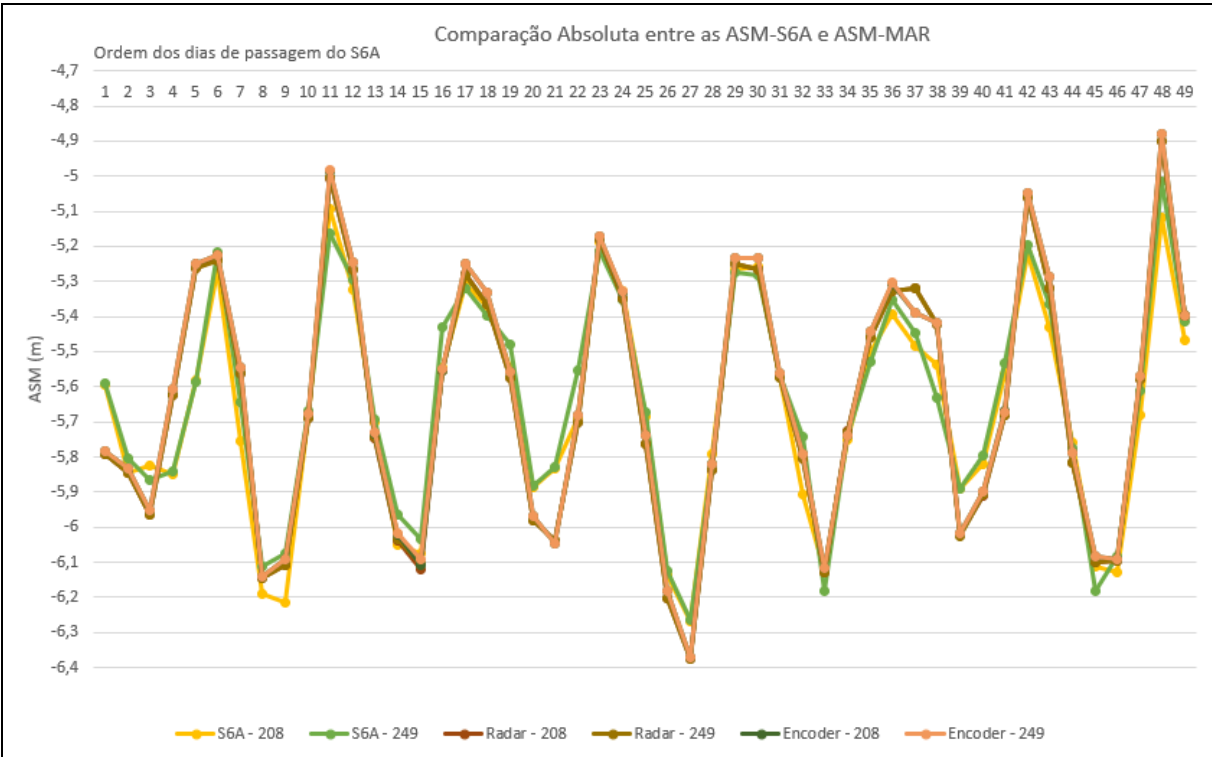


Figura 19 – Gráfico da comparação absoluta entre as ASM-S6A e ASM-MAR, considerando apenas as séries temporais escolhidas.

Fonte: Autor (2024).

Analisando a Figura 19, o ideal seria que as 6 curvas coincidisse entre si. Mas, isso não ocorreu devido as particularidades de cada equipamento, e a forma como cada um coleta as informações e variáveis sobre o estado do mar. Também, a metodologia e correções aplicadas no processamento dos dados.

Observando as Tabelas 5, 6, 7 e 8, os valores da média aritmética das séries 208 e 249 foram bem próximos. Para verificar se a diferença entre as duas séries é estatisticamente significativa foi realizado o teste T-Student, com a hipótese nula considerando a média entre as duas séries temporais iguais.

Antes do teste T-Student, foi realizado um teste F para verificar se as variâncias entre as séries eram estatisticamente iguais (hipótese nula). O valor encontrado para o parâmetro p foi de 0,9321. O nível de significância foi de 0,5%. O valor de p foi maior que o valor do nível de significância, com isso, não se rejeitou a hipótese nula. Ou seja, as variâncias entre as duas séries temporais de ASM são estatisticamente iguais.

Após a realização do teste F, procedeu-se ao cálculo do valor de p para o teste T-Student. A importância do teste F foi para indicar o comportamento da variância das séries temporais. O valor de p foi de 0,3595. O nível de significância foi de 0,5%. O valor de p foi menor que o valor do nível de significância, com isso, rejeitou-se a hipótese nula. Ou seja, as médias entre as séries temporais 208 e 249 são estatisticamente diferentes.

O Erro Médio Quadrático (EMQ) foi calculado apenas para a validação da qualidade das ASM-S6A e para definir a escolha da série temporal. A Tabela 9 ilustra os valores do EMQ de cada série temporal escolhida nas 4 comparações feitas.

Tabela 9: Valores de EMQ.

Série Temporal	Comparação Absoluta-Radar	Comparação Absoluta-Encoder	Comparação Relativa-Radar	Comparação Relativa-Encoder
208	0,085505	0,088237	0,099369	0,102225
209	0,088578	0,090003	0,102727	0,104862
248	0,092947	0,092132	0,102675	0,117788
249	0,086311	0,086338	0,107129	0,119008
260	0,085165	0,084601	0,106732	0,106686
261	0,088421	0,088163	0,118382	0,118351

Fonte: Autor (2024)

Ao observar a Tabela 9, percebeu-se que há duas séries com os menores EMQ, a 208 e a 260. Na comparação absoluta, a série 260 é a que apresentou o menor valor de EMQ, já na comparação relativa, a série 208 foi a que apresentou o menor valor de EMQ. Ao comparar as distâncias que essas séries estão do marégrafo de Arraial do Cabo, a 208 está 36,9047 km. E a série 260 está a 22,0966 km. Como a distância ao marégrafo pode ser um fator de escolha da série, pois quanto mais próximo do marégrafo a série estiver, mais o estado do mar pode ser melhor representado.

Para a definição da qualidade da ASM oriunda do S6A, a série escolhida foi a 260. Com isso, observou-se os valores calculados para o CCP nas tabelas 5 e 6, considerando a série temporal escolhida. Os valores escolhidos foram os da tabela 5, pois apresentaram o maior CCP. Então, a qualidade da ASM oriunda do S6A foi de $\pm 0,0518$ metros. As médias de ASM-S6A e ASM-MAR (Radar) e ASM-MAR (Encoder) foram, respectivamente, -5,6374 metros; -5,6472 metros e -5,634 metros. Ou seja, não apresentaram diferenças significativas, pois se encontraram dentro do intervalo do desvio-padrão.

4.2 Resultados para a Região da Terra do Fogo - Argentina

A tabela 10 ilustra os valores de ASM para algumas séries temporais em alguns dias em que o S6A coletou as variáveis. Assim como em Arraial do Cabo, a série temporal mais próxima da costa da Terra do Fogo foi a série 312. Então a relação entre o número da série com a distância até a costa é inversa. Quanto maior o número da série, menor é a distância dela para a costa. Observando a Tabela 10, percebe-se que os valores de ASM foram positivos, diferentemente, das ASM em Arraial do Cabo. Apesar de ser o mesmo elipsoide de revolução adotado (WGS84), a posição desse elipsoide com relação a superfície do oceano é diferente. Isso reforça o que foi esperado por RAPP (1991).

Tabela 10 – Valores das ASM das séries temporais (1 a 5 e 308 a 312) na região da Terra do Fogo.

Série Temporal	26/12/2020 ASM(m)	05/01/2021 ASM(m)	15/01/2021 ASM(m)	25/01/2021 ASM(m)	04/02/2021 ASM(m)
1	12,3659	12,2815	12,3900	12,2659	12,2952
2	12,3101	12,2412	12,3134	12,2386	12,2816
3	12,3468	12,2664	12,3052	12,2128	12,3274
4	12,3736	12,2464	12,3154	12,2442	12,2864
5	12,3714	12,2286	12,3597	12,2742	12,2814
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
308	12,3603	12,2324	12,2973	12,2795	12,3226
309	12,3047	12,2410	12,2885	12,2182	12,2955
310	12,2935	12,2490	12,3059	12,2810	12,3173
311	12,3779	12,2659	12,3266	12,2279	12,2340
312	12,3794	12,2375	12,3141	12,2350	12,3006

Fonte: Autor (2024).

Ao considerar todas as séries temporais (312 séries) que compreenderam os dias de passagem do S6A pela região de estudo (50 dias), a média de variação da ASM foi de 0,1296 metros, ou seja, 12,96 centímetros. Já o desvio padrão foi de $\pm 0,0113$ metros. Segundo Dangendorf et al. (2019), o degelo da Antártida pode ser um dos fatores que contribui para o aumento nos valores de ASM. Mas, a causa da variação das ASM na região não deve se limitar a apenas o degelo da Antártida, esse é um dos fatores e outros podem contribuir para o fenômeno.

4.3 Discussão

Giehl, Dalazoana e Santana (2022) compararam as observações altimétricas provenientes do satélite Sentinel-3A com dados maregráficos oriundos das estações maregráficas da RMPG. Eles agruparam as observações em células, considerando um raio de 100 km sobre o oceano a partir da localização dos marégrafos. O intervalo de tempo foi de novembro de 2017 até abril de 2020. Em cada estação maregráfica, a célula altimétrica mais próxima e que obteve a melhor correlação com os dados maregráficos foi escolhida.

Os CCP das células foram iguais e acima de 0,90 em todos os marégrafos e destacou-se as pequenas distâncias entre as células de altimetria escolhidas e os marégrafos em Arraial do Cabo, Salvador e Fortaleza, apresentando os valores de 5,37 km, 4,51 km e 4,62 km,

respectivamente. O que não ocorreu nesse estudo, visto que a série temporal escolhida estava, em média, 25,0870 km de distância do marégrafo de Arraial do Cabo. Uma das explicações para isso pode ser pelo fato do Sentinel-6A coletar algumas variáveis apenas a uma certa distância da costa, devido a influência da baixa profundidade e da costa nas relações entre reflexão e absorção do sinal do altímetro.

Considerando a célula escolhida pelos autores, para a mesma região deste trabalho, a média de ASM oriunda do Sentinel-3A foi de $-5,59 \text{ m} \pm 0,27 \text{ m}$, entre 2017 e 2020. Neste trabalho, a média de ASM oriunda do Sentinel-6A foi de $-5,6374 \text{ m} \pm 0,0518 \text{ m}$, para o intervalo entre 2020 e 2022. Considerando o mesmo elipsoide de revolução adotado e pelo sinal negativo nos valores de ASM, indicando a superfície do mar abaixo do elipsoide, nota-se que houve uma variação negativa de 0,05 m na ASM para a região. Mas, não se pode afirmar que o Nível do Mar está aumentando ou diminuindo, pois, considerando o desvio-padrão, os valores podem ser significativamente iguais.

Heinoja, Delpeche-Ellmann e Ellmann (2023) analisaram o desempenho das missões Sentinel-3A, Jason-3 e Sentinel-6A, no sentido de determinar a variação do nível do mar e a precisão de cada missão na região leste do Mar Báltico. Os autores utilizaram observações oriundas dos satélites, dados de marégrafos, modelos hidrodinâmicos e um modelo geoidal de alta resolução. Os resultados indicaram que a precisão variou para a missão Jason-3 em um intervalo de 1,68 cm para 50,14 cm. Já para a missão Sentinel-3A, a variação da precisão foi de 2,8 cm a 46,27 cm. E para a missão Sentinel 6A, a precisão variou de 3,5 cm a 43,90 cm. Com isso, apesar de interferências nos resultados devido a influência da presença de gelo marinho na região, o Sentinel-6A foi a missão que apresentou os melhores resultados. Comparando a precisão calculada por esse trabalho ($\pm 5,18 \text{ cm}$) e a precisão que os autores alcançaram com a missão Sentinel-6A, percebe-se que a precisão deste trabalho está dentro do intervalo calculado pelas autoras.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Sentinel-6A possui diversos equipamentos e sensores embarcados que servem para coletar dados sobre a área sobrevoada. Um dos equipamentos é o altímetro denominado de Poseidon-4, este sendo um radar de abertura sintética de alta resolução. Segundo a ESA (2022f), comparados as missões CryoSat e Sentinel-3, o S6A apresenta uma precisão maior do que essas missões. Isso pode ser comprovado, comparando os resultados encontrados por Giehl, Dalazoana e Santana (2022) em que a precisão da média de ASM, derivada do Sentinel-3, foi de $\pm 0,27$ m, com os resultados encontrados por essa pesquisa, em que a precisão da média de ASM, derivada do Sentinel-6A foi de $\pm 0,05$ m. Ou ainda, no estudo de Heinoja, Delpeche-Ellmann e Ellmann (2023), em que os resultados indicaram que a precisão variou para a missão Jason-3 em um intervalo de 1,68 cm para 50,14 cm. Já para a missão Sentinel-3A, a variação da precisão foi de 2,8 cm a 46,27 cm. E para a missão Sentinel 6A, a precisão variou de 3,5 cm a 43,90 cm.

Os coeficientes do Polinômio Interpolador de Hermite foram calculados por meio de um script no *software* Octave. A ideia central desse *script* foi, primeiramente, construir uma lei de formação que modele os dados e verifique os erros cometidos. Essa modelagem foi realizada considerando um sistema de equações lineares. Ao obter a lei de formação, essa ainda não foi considerada um Polinômio Interpolador de Hermite. A matriz de Vandermonde foi utilizada para encontrar os coeficientes do Polinômio Interpolador de Hermite.

Ao realizar a validação do polinômio de Hermite gerado após a interpolação, os pontos de verificação foram inseridos no polinômio e o resultado comparado com os valores registrados pelos marégrafos. A ordem do erro foi de -10^{15} , aproximadamente. Com isso, a forma do polinômio escolhida (polinômio completo de 2º grau) conseguiu interpolar as ASM-MAR para os mesmos instantes de tempo das ASM-S6A.

As comparações absoluta e relativa foram realizadas com o intuito de obter a qualidade das ASM entre os dados da maregrafia e da ALTSAT. Para a definição da série temporal do S6A que mais se aproximou do estado do mar registrado pelo marégrafo de Arraial do Cabo foram utilizados critérios de seleção como: a menor média, o menor desvio padrão, o maior CCP, o menor EMQ e a distância do footprint até o marégrafo. Alguns critérios tiveram séries diferentes que os atenderam, mas a série escolhida foi a que estava mais próxima do marégrafo comparando com as outras séries que atenderam os critérios de seleção. A célula escolhida foi a 260, distante a 22,0966 km do marégrafo escolhido. Com isso, a qualidade da ASM obtida pelos dados do S6A foi de $\pm 0,0518$ metros. Já o valor médio da ASM-S6A foi de -5,6374 metros. Ao comparar com as ASM-MAR (Radar) e ASM-MAR (Enconder) verificou-se que não houve diferenças significativas, pois se encontraram dentro do intervalo da precisão.

Para a região da Terra do Fogo, considerou-se uma distância da costa de até 100 km. Após o cálculo da variação diária das ASM-S6A, procedeu-se ao cálculo da média e do desvio padrão para determinar a variação e a precisão para o período compreendido entre 26 de dezembro de 2020 a 26 de abril de 2022. A média de variação da ASM na região foi de 0,1296 metros, ou seja, 12,96 centímetros. Já o desvio padrão foi de $\pm 0,0113$ metros.

Ao analisar a qualidade da ASM-S6A, por meio da comparação com as ASM-MAR, oriundas das leituras maregráficas dos sensores Radar e Encoder, verificou-se que o Sentinel-

6A possui uma precisão centimétrica. E ao analisar a variação das ASM-S6A para a região da Terra do Fogo – Argentina, constatou-se que para o intervalo de 486 dias, essa variação também foi centimétrica.

Para trabalhos futuros recomenda-se a análise da linha de processamento do S6A – F08 e compará-la com os dados da S6A – F06, esta adotada por este trabalho. Ainda assim, recomenda-se a elaboração de uma rotina para auxiliar nos cálculos. Recomenda-se também, realizar essa análise para outros marégrafos e principalmente para os marégrafos que sofrem influência de rios, como por exemplo, o marégrafo de Santana – Amapá. Além de, utilizar outros tipos de marégrafos para a validação, como os marégrafos de boia.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALENCAR, J. C. M. Datum altimétrico brasileiro. In: IBGE. **Separata de Cadernos de Geociências**, N° 5. IBGE, 1990. n. 5. p. 69-73.

ALLEY, R. B., BERNTSEN, T., BINDOFF, N., CHEN, Z., CHIDTHAISONG, A., FRIEDLINGSTEIN, P., GREGORY, J., HEGERL, G., HEIMANN, M., HEWITSON, B., HOSKINS, B., JOOS, F., JOUZEL, J., KATTSOV, V., LOHMANN, U., MANNING, M., MATSUNO, T., MOLINA, M., NICHOLLS, N., OVERPECK, J., QIN, D., RAGA, G., RAMASWAMY, V., REN, J., RUSTICUCCI, M., SOLOMON, S., SOMERVILLE, R., STOCKER, T., STOTT, P., STOUFFER, R., WHETTON, P., WOOD, R., WRATT, D. Summary for policymakers. In: SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, B., TIGNOR, M., MILLER, H. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. p. 2-18.

ARANA, J. **Introdução a Geodésia Física**. FCT-UNESP – Presidente Prudente, 2009

AVISO. **Missions**. Disponível em:
<https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions>.
Acesso em: 10 jan. 2020.

AVISO. **Products**. Disponível em:
<https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt.html>.
Acesso em: 02 out. 2023.

AZEVEDO, P. R. M. **Introdução à Estatística**. Natal: EDUFRRN, 2016. Disponível em:
<https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/21298/2/Introdução%20à%20Estatística%20%28digital%29.pdf>.
Acesso em: 30 abr. 2023.

BARNETT, T. P. The estimation of “global” sea level change: a problem of uniqueness. **Journal of Geophysical Research: Oceans, Wiley Online Library**, v. 89, n. C5, p. 7980–7988, 1984.

BENVENISTE, J. Radar altimetry: past, present and future. In: VIGNUDELLI, S., KOSTIANOV, A. G., CIPOLLINI, P., BENVENISTE, J. **Coastal Altimetry**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p. 1–17.

BOOR, C, HÖLLIG, K, SABIN, M. High accuracy geometric Hermite interpolation. **Computer Aided Geometric Design**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 269-278, dez. 1987. Elsevier BV.

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**, [S. L.], v. 72, n. 1, p. 142-158, dez. 2019. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/50434>. Acesso em: 30 abr. 2023.

CARGNELUTTI, J. **Fundamentos Conceituais da Determinação do Geoide pelo Método Gravimétrico**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geomática, UFSM, Santa Maria, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/9596/Cargnelutti.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 set. 2022.

CARRIÓN, J. L. **Vínculo do Datum Vertical Equatoriano ao International Height Reference System – IHRs**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, 2017.

CARVALHO, E. M. **Estudos Numéricos dos Métodos de Interpolação: Lagrange, Newton, Hermite e Spline Cúbico**. 2016. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, UFSJ, São João del Rei, 2016. Disponível em: <https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/profmat/DISSMES/T2014/08dissT2014.pdf>. Acesso em: 30 maio 2023.

CHELTON, D. B., RIES, J. C., HAINES, B. J., LEE-LUENGFU, CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, L. L., CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and applications**. Boca Raton: Academic Press, 2001. cap. 1, p. 1–122.

CHEN, X., ZHANG, X., CHURCH, J., WATSON, C., KING, M., MONSELESAN, D., LEGRESY, B., HARIG, C. The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993–2014. *Nature Clim Change*, 492–495 (2017).

CORONATO, A. M. J., CORONATO, F., MAZZONI, E., VÁZQUEZ, M. The physical geography of Patagonia and Tierra del Fuego. **The Late Cenozoic Of Patagonia And Tierra del Fuego**, [S.L.], p. 13-55, 2008. Elsevier.

COSTA, N. S. S. Das zonas francas e sua importância na atualidade: os exemplos de Manaus e a Terra do Fogo. **Cadernos Metrópole**, [S. L.], v. 49, n. 22, p. 1-21, dez. 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cm/a/fyKNvJnsSPhzrpm4nLTqxdp/?lang=pt#>. Acesso em: 25 abr. 2024.

DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2005. f. 202. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

DANGENDORF, S., HAY, C., CALAFAT, F., MARCOS, M., PIECUCH, C., BERK, K., JENSEN, J. Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. **Nature Climate Change**, [S.L.], v. 9, n. 9, p. 705-710, 5 ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

DELOVSKI, T., BREDEMEYER, J., WERNER, K. Ads-b over satellite coherent detection of weak mode-s signals from low earth orbit. **The 4S Symposium 2016**, [S. L.], v. 1, n. 1, p. 1-13, maio 2016.

DIENG, H. B., CAZENAVE, A., MEYSSIGNAC, B., ABLAIN, M. New estimate of the current rate of sea level rise from a sea level budget approach. **Geophysical Research Letters**, [S.L.], v. 44, n. 8, p. 3744-3751, 22 abr. 2017. American Geophysical Union (AGU).

DINARDO, S., MARALDI, C., CADIER, E., RIEU, P., AUBLANC, J., GUEROU, A., BOY, F., MOREAU, T., PICOT, N., SCHARROO, R. Sentinel-6 MF Poseidon-4 radar altimeter: main scientific results from S6PP LRM and UF-SAR chains in the first year of the mission. **Advances In Space Research**, [S.L.], p. 1-39, jul. 2023. Elsevier BV.

DONLON, C. J., CULLEN, R., GIULICCHI, L., VUILLEUMIER, P., FRANCIS, R., KUSCHNERUS, M., SIMPSON, W., BOURIDAH, A., CALENO, M., BERTONI, R., RANCAÑO, J., POURIER, E., HYSLOP, A., MULCAHY, J., KNOCKAERT, R., HUNTER, C., WEBB, A., FORNARI, M., VAZE, P., BROWN, S., TAVERNIER, G. The Copernicus Sentinel-6 mission: enhanced continuity of satellite sea level measurements from space. **Remote Sensing of Environment**, [S.L.], v. 258, p. 112395, jun. 2021. Elsevier BV.

ESA. **Visão Geral: Sentinel 6A**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/overview>.
Acesso em: 10 set. 2022.

ESA. **Sentinel Overview**. Disponível em:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions>.
Acesso em: 05 set. 2022a.

ESA. **Missões de Expansão Copernicus Sentinel**. Disponível em:
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions.
Acesso em: 05 set. 2022b.

ESA. **Copérnico Sentinel-6 Michael Freilich**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6>.
Acesso em: 10 ago. 2022c.

ESA. **Mission Objectives**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/mission-objectives>.
Acesso em: 05 set. 2022d.

ESA. **Satellite Description**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/satellite-description>.
Acesso em: 05 set. 2022e.

ESA. **Instrument Payload**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/instrument-payload>.
Acesso em: 05 set. 2022f.

ESA. **Data Products**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-6/data-products>.
Acesso em: 05 set. 2022g.

ESA. **Sentinel-6 Data**. Disponível em:
<https://www.eumetsat.int/sentinel-6-data>.
Acesso em: 05 set. 2022h.

ESA. **Sentinel-3**. Disponível em:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3>.
Acesso em: 27 fev. 2023.

ESA. **CFOSAT (Satélite de Oceanografia Chinês-Francês)**. Disponível em:
<https://www.eoportal.org/satellite-missions/cfosat#eop-quick-facts-section>.
Acesso em: 27 fev. 2023a.

ESPIAGO, J. **Cartografía Geográfica: Fundamentos**. [S. L.]: UAM, 2022. Disponível em:
<http://guiadigital.uam.es/SCUAM/documentacion.php>.
Acesso em: 11 set. 2022.

EVERS-KING, H. **Advanced Microwave Radiometer for Climate (Amr-C) Instrument Specifics**. Disponível em:
<https://eumetsatspace.atlassian.net/wiki/spaces/SEN6/pages/1621688995/Advanced+Microwave+Radiometer+AMR-C+instrument+specifics>.
Acesso em: 05 set. 2022.

FREDERIKSE, T., LANDERER, F., LAMBERT, C., ADHIKARI, S., PARKES, D., HUMPHREY, V., DANGENDORF, S., HOGARTH, P., ZANNA, L., CHENG, L., WU, Y. H. The causes of sea-level rise since 1900. **Nature**, [S.L.], v. 584, n. 7821, p. 393-397, 19 ago. 2020. Springer Science and Business Media LLC.

FREITAS, S. R. C., MEDINA, A. S. Associated problems to link South American vertical networks and possible approaches to face them. In: DREWES, H., DODSON, A. H., FORTES, L. P. S., SÁNCHEZ, L., SANDOVAL, P. (Ed.). **Vertical Reference Systems**. IAG Symposium 124, Cartagena, Colombia. Berlim: Springer-Verlag, 2002b. p. 318-323.

FREITAS, S. R. C., BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **IGES Bulletin**, Milan, v. 1, n. 9, p. 47-62, jun. 1999.

GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. Curitiba: UFPR, 1999.

GGOS. **GGOS Focus Areas**. Disponível em:

<https://ggos.org/about/org/fa/>.

Acesso em: 10 set. 2023.

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**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado) - PPGCG, UFPR, Curitiba-PR, 2020.

GIEHL, S., DALAZOANA, R. Panorama geral das técnicas de observação do nível do mar para propósitos geodésicos. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S.L.], v. 74, n. 2, p. 266-289, abr. 2022. EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia.

GIEHL, S., DALAZOANA, R., SANTANA, T. A. Comparação absoluta entre observações do satélite Sentinel-3A e dos marégrafos da RMPG em Imbituba, Arraial do Cabo, Salvador, Fortaleza e Santana. **Revista brasileira de cartografia**, v. 74, n. 4, p. 911–926, 2022.

GRUBER, N., CARTER, D. C. B. R., FEELY, R. A., HEUVEN, S. V., HOPPEMA, M., ISHII, M., KEY, R. M. The oceanic sink for anthropogenic CO_2 from 1994 to 2007. **Science (New York, N.Y.)**, v. 363, n. 6432, p. 1193–1199, 2019.

GUIMARÃES, G. N., BLITZKOW, D. Problema de valor de contorno da Geodésia: uma abordagem conceitual. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 17, n. 4, p. 607-624, out. 2011.

HAY, C. C., MORROW, E., KOPP, R., MITROVICA, J. Probabilistic reanalysis of twentieth-century sea-level rise. **Nature**, [S.L.], v. 517, n. 7535, p. 481-484, 14 jan. 2015. Springer Science and Business Media LLC.

HEINOJA, L. L., DELPECHE-ELLMANN, N., ELLMANN, A. Examining the performance of along-track multi-mission satellite altimetry – A case study for Sentinel-6. **Journal Of Geodetic Science**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 1-20, 1 jan. 2023. Walter de Gruyter GmbH. Disponível em:

<https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jogs-2022-0159/html>

Acesso em: 26 abr. 2024.

HOFMANN-WELLENHOF, B., MORITZ, H. **Physical Geodesy**. 2ªed. Graz, Austria: Springer-Verlag Wien, 2006.

HÖLLIG, K., KOCH, J. Geometric Hermite interpolation. **Computer Aided Geometric Design**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 567-580, set. 1995. Elsevier BV.

IAG. Definition and realization of an International Height Reference System (IHRs). Prague, Czech Republic: [s.n.], jul. 2015. Adopted by **the IAG Council at the XXVIth IUGG General Assembly**.

IAG. **Description of the Global Geodetic Reference Frame**. IAG Newsletter, 2016.

IBGE. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG 2001/2015**. 2016. [s.l.: s.n.].

IBGE. **Cartograma da RMPG**. 2020. Disponível em:
https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/cartograma/CARTOGRAMA_RMPG_modelo%202020.pdf.
Acesso em: 29 abr. 2023

ICGEM, **International Centre for Global Earth Models**. 2022. Disponível em:
<http://icgem.gfz-potsdam.de/calcpoints>.
Acesso em: 02 out. 2023

IGN. **Red de Nivelación Argentina**. Disponível em:
<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Nivelacion/Introduccion>.
Acesso em: 28 set. 2023.

IHDE, J., BARZAGHI, R., MARTI, U., SÁNCHEZ, L., SIDERIS, M., DREWES, H., FOERSTE, C., GRUBER, T., LIEBSCH, G., PAIL, R. **Report of the Ad-Hoc Group on an International Height Reference System (IHRs)**. [s.l.: s.n.], 2015. Disponível em:
<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1300913/1300913.pdf>.
Acesso em: 18 mar 2023.

IHDE, J., SÁNCHEZ, L., BARZAGHI, R., DREWES, H., FOERSTE, C., GRUBER, T., LIEBSCH, G., MARTI, U., PAIL, R., SIDERIS, M. Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHRs). **Surveys in Geophysics, Springer Nature**, v. 38, n. 3, p. 549–570, mar. 2017.

JPL-NASA. **Surface Water Ocean Topography Satellite Mission (SWOT)**. Disponível em:
<https://swot.jpl.nasa.gov>
Acesso em: 20 jan. 2020

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**, Informa UK Limited, v. 25, n. 3, p. 213–234, jul. 2002.

LU, Z., QU, Y., QIAO, S. **Geodesy: Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems**. Berlin Heidelberg: Springer, 2014.

LUZ, R. T., DE FREITAS, S. R. C., DALAZOANA, R. Acompanhamento do datum altimétrico Imbituba através das redes altimétrica e maregráfica do sistema geodésico brasileiro. In: **Vii Congreso Internacional de Ciencias de La Tierra**, Santiago, Chile.

MAGALHAES, J., LAPA, I. G., SANTOS-FERREIRA, A. M., DA SILVA, J. C. B., PIRAS, F., MOREAU, T., AMRAOUI, S., PASSARO, M., SCHWATKE, C., HART-DAVIS, M., MARALDI, C., DONLON, A. Using a tandem flight configuration between sentinel-6 and jason-3 to compare sar and conventional altimeters in sea surface signatures of internal solitary waves. **Remote Sensing**, [S. L.], v. 392, n. 15, p. 1-17, jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/2/392>. Acesso em: 28 mar. 2023.

MAIWALD, F., BROWN, S. T., KOCH, T., MILLIGAN, L., KANGASLAHTI, P., SCHLECHT, E. Completion of the AMR-c instrument for Sentinel-6. **IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing**, [S.L.], v. 13, p. 1811-1818, 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MARTINS, M. E. G. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, [S. L.], v. 2, n. 2, p. 1-2, jan. 2014.

MATTOS, V. L. D. **Estatística Básica**. Seropédica: Edur, 2010

MELO, P., OLIVEIRA, L. Interpolação de Hermite na transformação de coordenadas entre sistemas de referência geodésicos, visando à modelagem das distorções entre os diferentes sistemas adotados no Brasil. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 3, p. 50-59, mar. 2019.

MELO, P. **Transformação de Redes de Coordenadas Geodésicas Bidimensionais pela Modelagem de Hermite**. 2018. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Cartográfica, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018.

MEYSSIGNAC, B., LEMOINE, J. M., CHEN, GM., CAZENAVE, A., GEGOUT, P., MAISONGRANDE, P. Interannual variations in degree-2 Earth's gravity coefficients $C_{2,0}$, $C_{2,2}$, and $S_{2,2}$ reveal large-scale mass transfers of climatic origin. **Geophysical research letters**, v. 40, n. 15, p. 4060–4065, 2013.

MOIRANO, J., BRUNINI, C., FONT, G., LAURÍA, E., RAMOS, R. Hacia una nueva referencia vertical em argentina. In: **Reunión Científica AAGG**, 21. Rosário, 2002. Rosário: AAGP, 2002. p. 89-93.

NEREM, R. S., BECKLEY, B. D., FASULLO, J. T., MITCHUM, G. T. Climate-change-driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. **Earth, Atmospheric, And Planetary Sciences**, S.L, v. 115, n. 9, p. 1-4, fev. 2018.

NICACIO, E., DALAZOANA, R. O emprego da solução do problema de valor de contorno da geodésia à vinculação nacional a um sistema vertical de referência global: uma revisão conceitual. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 71, n. 1, p. 122–148, 2019. DOI: 10.14393/rbcv71n1-46667. Disponível em:

<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/46667>.

Acesso em: 22 fev. 2023.

NICHOLLS, R. J., CAZENAVE, A. Sea-level rise and its impact on coastal zones. **Science**, American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 328, n. 5985, p. 1517–1520, jun. 2010.

PASSARO, M. SCHLEMBACH, F., OELSMANN, J., DETTMERING, D., SEITZ, F., Coastal assessment of Sentinel-6 altimetry data during the tandem phase with Jason-3. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 15, n. 17, p. 4161, 24 ago. 2023. MDPI AG.

PACINO, M. C., DEL COGLIANO, D., FONT, G., MOIRANO, J., NATALÍ, P., LAURÍA, E., RAMOS, R., MIRANDA, S. Activities related to the materialization of a new vertical sytem for Argentina. **IAG Series**, v. 130, 2007.

PEREIRA, R. A. D. **Conexão das Redes Verticais Fundamentais do Brasil e da Argentina com Base em Números Geopotenciais**. 2009. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Geodésicas, UFPR, Curitiba, 2009.

PLAG, H. P., PEARLMAN, M. (Ed.). Global geodetic observing system: meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020. **Reno NV e Cambridge MA: Springer Berlin Heidelberg**, 2009.

RAPP, R. H. **Geometric Geodesy**. Ohio: Ohio State University Department Of Geodetic Science And Surveying, 1991. Disponível em:

<https://kb.osu.edu/handle/1811/24333>.

Acesso em: 07 set. 2022.

SÁNCHEZ, L. Reference surface for the unified height system in the northern part of south America. In: ÁDÁM, J., SCHWARZ, K. P. (Ed.). **Vistas for Geodesy in the New Millennium**. IAG Symposium 125. Berlim: Springer-Verlag, 2002. p. 84-89.

SÁNCHEZ, L., SIDERIS, M. G. Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHRs). **Geophysical Journal International**, [S.L.], p. 570-586, 21 jan. 2017. Oxford University Press (OUP).

SÁNCHEZ, L., AGREN, J., HUANG, J., WANG, Y. M., MÄKINEN, J., PAIL, R., BARZAGHI, R., VERGOS, G. S., AHLGREN, K., LIU, Q. Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRs). **Journal Of Geodesy**, [S.L.], v. 95, n. 3, p. 1-33, 22 fev. 2021. Springer Science and Business Media LLC.

SANCHEZ, L., WZIONTEK, H., GRUBER, T., TANAKA, Y. Gravity reference frame. 2023. Disponível em:
<https://ggos.org/item/gravity-reference-frame/#learn-this>.
Acesso em: 28 set. 2023.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Berlin: Walter De Gruyter, 2003.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2001. 432 p. Disponível em:
[http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/Torge-Geodesy\(2001\).pdf](http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/Torge-Geodesy(2001).pdf).
Acesso em: 22 nov. 2022.

VENEGAS, R. M., ACEVEDO, J., TREML, E. A. Three decades of ocean warming impacts on marine ecosystems: A review and perspective. **Deep-sea research. Part II, Topical studies in oceanography**, v. 212, n. 105318, p. 105318, 2023.

ZANCHETTIN, D., BRUNI, S., RAICICH, F., LIONELLO, P., ADLOFF, F., ANDROSOV, A., ANTONIOLI, F., ARTALE, V., CARMINATI, E., FERRARIN, C., FOFONOVA, V., NICHOLLS, R. J., RUBINETTI, S., RUBINO, A., SANNINO, G., SPADA, G., THIÉBLEMONT, R., TSIMPLIS, M., UMGIESSER, G., VIGNUDELLI, S., WÖPPELMANN, G., ZERBINI, S. Sea-level rise in Venice: historic and future trends (review article). **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S.L.], v. 21, n. 8, p. 2643-2678, 1 set. 2021. Copernicus GmbH.

ZHENG, J., XU, X.Y., XU, Y., GUO, C. Coastal waveform retracking for synthetic aperture altimeters using a multiple optimization parabolic cylinder algorithm. **Remote Sensing**, [S.L.], v. 15, n. 19, p. 4665, 23 set. 2023. MDPI AG.

ZHOU, B., WATSON, C., BEARDSLEY, J., LEGRESY, B., KING, M. A. Development of a GNSS/INS buoy array in preparation for SWOT validation in bass strait. **Frontiers In Marine Science**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 1-16, 19 jan. 2023. Frontiers Media SA.

ZHRAN, M. An evaluation of GNSS radio occultation atmospheric profiles from Sentinel-6. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 654-665, dez. 2023. Elsevier BV.

7. APÊNDICE

SCRIPT PARA A INTERPOLAÇÃO DE HERMITE NO SOFTWARE OCTAVE, VERSÃO 9.1.0

```
clear all
clc
format long g
#valores medidos
Med1 = -5.552
Med2 = -5.554
# minutos considerados
A1 = 15
B1 = 16
#matriz
a11 = A1^2
a12 = A1
a13 = 1
a21 = B1^2
a22 = B1
a23 = 1
A = [ a11 a12 a13 ; a21 a22 a23 ]
#vetor das observações
f11 = Med1
f21 = Med2
F = [ f11 ; f21 ]
#matriz dos coeficientes do polinômio
matriz_C = linsolve(A,F)
Fa = ((matriz_C(1,1))*(a11))+((matriz_C(2,1))*(a12))+((matriz_C(3,1))*(a13))
Fb = ((matriz_C(1,1))*(a21))+((matriz_C(2,1))*(a22))+((matriz_C(3,1))*(a23))
erro_a = Fa - f11
erro_b = Fb - f21
De_Fa = (2 * (matriz_C(1,1)) * A1) + (matriz_C(2,1))
De_Fb = (2 * (matriz_C(1,1)) * B1) + (matriz_C(2,1))
B11 = A1^2
B12 = A1
B13 = 1
B14 = 0
B21 = B1^2
B22 = B1
B23 = 1
B24 = 0
B31 = 2 * A1
B32 = 1
B33 = 0
B34 = 0
```

```

B41 = 2 * B1
B42 = 1
B43 = 0
B44 = 0
B = [B11 B12 B13 B14; B21 B22 B23 B24; B31 B32 B33 B34; B41 B42 B43 B44]
#vetor das observacoes
C11 = f11
C21 = f21
C31 = De_Fa
C41 = De_Fb
C = [C11;C21;C31;C41]
#matriz dos coeficientes do polinômio
matriz_BC = linsolve(B,C)
Pa
=
((matriz_BC(1,1))*(B11))+((matriz_BC(2,1))*(B12))+((matriz_BC(3,1))*(B13))+((matriz_BC(
4,1))*(B14)))
Pb
=
((matriz_BC(1,1))*(B21))+((matriz_BC(2,1))*(B22))+((matriz_BC(3,1))*(B23))+((matriz_BC
(4,1))*(B24)))
Pal = (2 * (matriz_BC(1,1)) * A1) + ((matriz_BC(2,1)))
Pbl = (2 * (matriz_BC(1,1)) * B1) + ((matriz_BC(2,1)))
erro_a = Pa - f11
erro_b = Pb - f21
erro_der_a = Pal - De_Fa
erro_der_b = Pbl - De_Fb

```