

ANÁLISE DE DADOS DE GRAVIMETRIA MARINHA: ESTUDO DAS ESTAÇÕES GEODÉSICAS PRÓXIMAS AO LITORAL BRASILEIRO NO CONTEXTO DA INFRAESTRUTURA INTERNACIONAL DE REFERÊNCIA ALTIMÉTRICA

ANALYSIS OF MARINE GRAVITY DATA: STUDY TO THE BRAZILIAN NEAR COAST GEODETIC STATIONS IN THE CONTEXT OF THE INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE FRAME

Letícia Cristina RIBEIRO¹, Giuliano Sant'Anna MAROTTA², Gabriel do Nascimento GUMARÃES³

Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica da Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro. Ala Central. E-mail: leticiacristinalcr@hotmail.com

Universidade de Brasília. Observatório Sismológico. Prédio SG -13 - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF. E-mail: marotta@unb.br

Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Civil, Campus Santa Mônica, Bloco 1Y - Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia – MG. E-mail: gabriel@ufu.br

Introdução

Global Geodetic Reference System (GGRS)

International Height Reference System (IHR)

Gravimetria marinha

Satélites Altimétricos

Apresentação de dados

Materiais, métodos e técnicas

Discussões, interpretações e resultados

Gravimetria marinha fornecida pelo BGI

Gravimetria marinha fornecida pela Marinha do Brasil

Gravimetria marinha fornecida pela ANP

Conclusões

Agradecimentos

Referências

RESUMO - A busca por um referencial geodésico integrado tem movimentado grande parte da comunidade geodésica afim de proporcionar uma realização consistente e que acompanhe as variações sofridas pela Terra. Para atingir tal objetivo é necessário aplicar grandezas medidas sobre a superfície terrestre. A aceleração de gravidade é uma destas grandezas, porém sua mensuração muitas das vezes é dificultada pelas condições naturais, como por exemplo, em áreas oceânicas, onde a mensuração é mais onerosa e de menor qualidade que na superfície terrestre, provocando assim, a necessidade de tratamento dos dados antes de seu uso. Apesar desse fator, dados gravimétricos marinhos podem fornecer maior riqueza de detalhes, não proporcionados por dados satelitais, às áreas costeiras. Assim, este trabalho buscou desenvolver metodologias de análise de dados gravimétricos marinhos dispostos ao redor das estações CEFT e IMBT, que farão parte do *International Height Reference Frame (IHRF)*. Foram analisados dados fornecidos pelo BGI, ANP e Marinha do Brasil, juntamente com dois modelos gravimétricos globais marinhos o DTU17 e GRAV31.1. Foram desenvolvidas sete metodologias de análise, destas, seis apresentaram resultados satisfatórios, o método de ajuste em área apresentou resultados mais consistentes. Verificou-se que os dados da Marinha do Brasil não são adequados para a área de estudo.

Palavras-chave: Gravidade. IHRF. Ajustamento. Interpolação.

ABSTRACT - The need for an integrated geodetic framework has brought together many researchers in geodesy in order to provide a consistent realization that includes temporal variations of the Earth and, for this purpose, it is necessary to use quantities measured on the earth's surface. The acceleration of gravity is one of those quantities, but its measurement is often hampered by natural conditions, such as in oceanic areas where measurement is of lesser quality than on the Earth's surface, requiring greater attention in the data treatment before use. Despite this, marine gravity data can provide greater detail to coastal areas that are not provided by satellite data. Therefore, in this research, the analysis of marine gravity data was developed around two geodetic stations, CEFT e IMBT, that will be part of the *International Height Reference Frame (IHRF)*. For this, different methodologies of adjustment and/or comparison were used, in which marine gravity data from different surveys were compared with two global gravity models resulting from satellite altimetry. After analysis, the area adjustment method showed more consistent results.

Keywords: Gravity. IHRF. Adjustment. Interpolation.

INTRODUÇÃO

O *Global Geodetic Observing System* (GGOS) foi criado em julho de 2003 pela *International Association of Geodesy* (IAG) (GGOS, 2021) com o intuito de integrar as áreas fundamentais da Geodésia, visando a criação de um referencial global geodésico que seja estável ao longo do tempo e que possua uma consistência homogênea (Ihde et al., 2015). A missão deste

referencial é produzir dados que permitam o monitoramento dos processos geodinâmicos e das mudanças climáticas da Terra (GGOS, 2021). A sua implementação e completa realização inclui coordenadas cartesianas geocêntricas e sua variação ao longo do tempo (X, \dot{X}), o potencial do campo de gravidade da Terra e sua variação ao longo do tempo (W, \dot{W}), o vetor de gravidade e sua variação ao longo do tempo (g, \dot{g}) e altitude física e sua variação ao longo do tempo (H, \dot{H}) (Sánchez et al., 2017).

As coordenadas cartesianas geocêntricas, juntamente com sua variação, é uma realidade consolidada por meio do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). A realização mais recente é o ITRF2020, a qual fornece coordenadas cartesianas e a velocidade de variação das coordenadas ao nível milimétrico. Atualmente, parte dos esforços da comunidade geodésica está concentrado na realização do *International Height Reference System* (IHRF) que foi definido em 2015, na resolução N° 1 (Drewes et al., 2016) publicada pela IAG. Esse sistema aborda definições e requisitos necessários para a obtenção do potencial de gravidade (W).

O cálculo de (W) requer disponibilidade de dados gravimétricos ao redor do ponto, em um raio de 210 km (Sánchez et al., 2021). Nas estações litorâneas esse fator impulsiona o uso de

diferentes fontes de dados para complementar as informações gravimétricas no oceano. Uma dessas fontes que podem ser usadas são os dados gravimetria marinha mensurados a bordo de navios.

Por serem medidas realizadas em movimento, os dados de aceleração de gravidade marinhos muitas das vezes assumem valores que se destoam dos pontos que estão próximos, gerando assim, a necessidade de análise para verificar se esses valores são *outliers* ou não, necessitando, portanto, de refinamento dos dados antes de aplicá-los. Porém, essa adequação de dados gravimétricos marinhos não é recorrente na comunidade científica e, portanto, não há uma metodologia definida para essa etapa. Em contrapartida, Lequentrec-Lalancette et al. (2016) e Barzaghi et al. (2018) usaram dados de gravimetria marinha no mar Mediterrâneo e, em ambos trabalhos, foram aplicadas análises estatísticas para eliminar os dados considerados *outliers*.

Sendo assim, considerando que no Brasil há seis estações IHRF previstas na primeira realização, das quais duas (CEFT e IMBT) são litorâneas, e considerando também a necessidade de refinamento dos dados gravimétricos marinhos para seu uso, esta pesquisa teve o intuito de desenvolver uma metodologia de análise de dados de gravimetria marinha ao redor dessas estações (Figura 1).

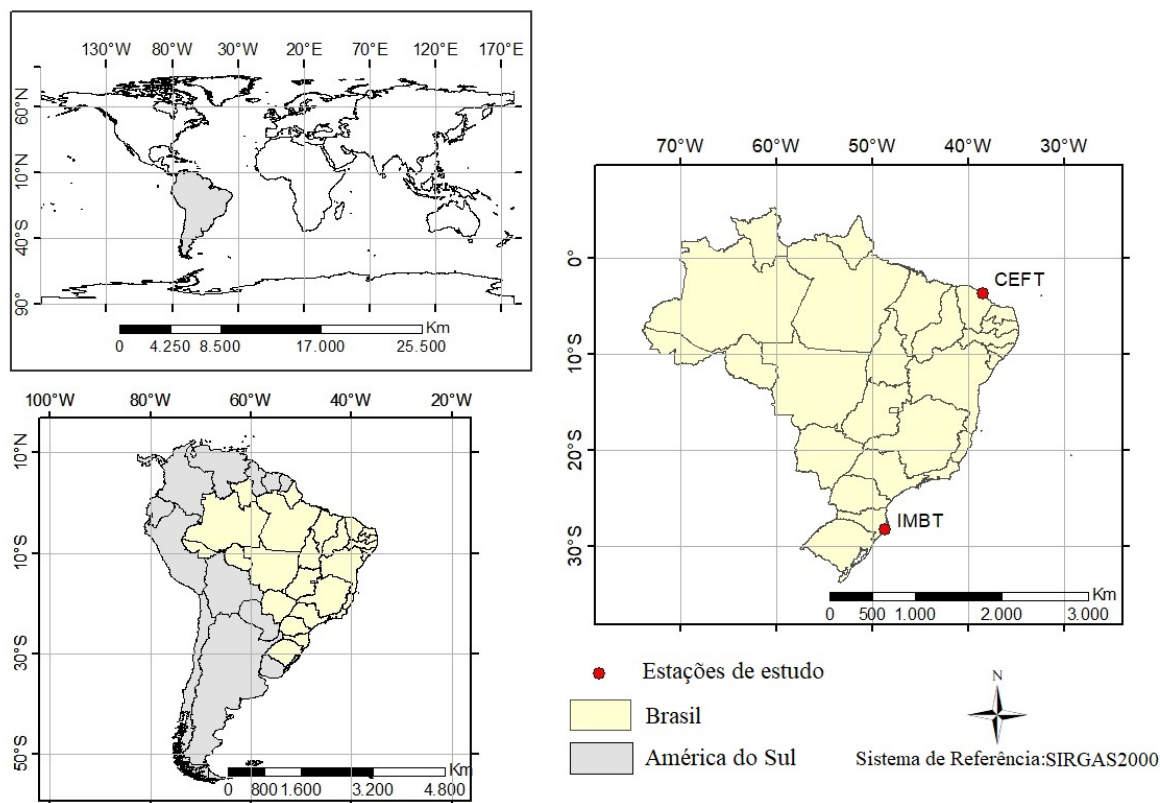


Figura 1 – Localização das estações de estudo

Como parâmetro para esta análise, foram usados modelos globais de gravidade marinha, que apesar de não fornecerem dados de alta frequência como os medidos em navios, foram adotados nesta pesquisa como referência, devido ao fato de não se ter informações sobre os procedimentos de levantamento e processamento dos dados de gravidade marinha medidos a bordo de navios, tais como: se há um ponto de partida do levantamento, se foram medições realizadas em circuitos fechados ou abertos, se foram aplicadas correções Eötvös, de maré, de deriva, da latitude, ou até mesmo, se foram aplicadas correções, quais foram as formulações utilizadas, e, qual a precisão destas medições. Essa falta de informações pode ser devido ao fato de que não são medidas recentes, a maioria dos dados foram levantados entre as décadas de 60 a 80, portanto,

GLOBAL GEODETIC REFERENCE SYSTEM (GGRS)

A necessidade de monitoramento, compreensão e representação do planeta Terra, provocada por seu dinamismo, impulsionou a criação de uma infraestrutura de nível global que seja precisa e que monitore as mudanças da Terra. A Geodésia, ciência que acompanha as evoluções tecnológicas, fornece referenciais estáveis e consistentes capazes de proporcionar este controle.

Com base nisso, a Assembleia Geral das Nações Unidas adotou a resolução 69/266 em 26 de fevereiro de 2015 (Tóth, 2017) que aborda sobre o *Global Geodetic Reference Frame* (GGRF). Esta infraestrutura corresponde à realização do *Global Geodetic Reference System* (GGRS), que, por sua vez, é um sistema que visa correlacionar áreas da Geodésia, integrando-as em um único sistema de âmbito global.

O GGRS é formado por modelos matemáticos e físicos, teorias e metodologias geodésicas que compreendem as componentes terrestres e celestes.

O GGRF é estabelecido por meio de pontos na superfície física, satélites de baixa órbita e objetos celestes, fornecendo parâmetros que descrevem a geometria e a gravidade ao longo do tempo. O

INTERNATIONAL HEIGHT REFERENCE SYSTEM (IHRS)

A posição de objetos no espaço é determinada por coordenadas planimétricas e altimétricas. O ITRS é o sistema responsável pelos parâmetros de determinação das coordenadas planimétricas e de altitude geodésica. A sua mais recente realização o ITRF2020 (*International Terrestrial Reference Frame – ITRF*) (Altamimi et al., 2022) proporciona a obtenção de coordenadas e

há limitação da tecnologia e, talvez, perda de informações.

Outro fator que levou a adoção dessa metodologia é que, como pode ser visto em Wessel & Watts (1988), Torge (1989), Hunegnaw et al. (2008) e Lequentrec-Lalancette et al. (2016), os dados de gravidade marinha não alcançam alta precisão como a gravimetria terrestre. Segundo os referidos autores as causas variam, desde a plataforma de medição que não é totalmente estabilizada, até erros sistemáticos do instrumento, perda do ponto de gravidade de referência e incertezas no sistema de navegação que provoca erros nas direções de curso dos navios e afeta a correção Eötvös. Por outro lado, sua utilização é indispensável na tentativa de eliminar ou minimizar o efeito de borda que é aplicado aos modelos globais de gravidade marinha.

intuito do GGRF é produzir uma rede de pontos terrestres a nível global, com densificações nacionais e regionais de infraestrutura geodésica (Tóth, 2017).

São diversas as aplicações do GGRF, como por exemplo, no monitoramento e gerenciamento de desastres naturais, mudanças climáticas e monitoramento do nível do mar, informações geoespaciais, mapeamento e navegação, além de proporcionar, também, benefícios econômicos de acordo com UN-GGIM (2015).

O GGRS/GGRF tem como propósito a compatibilização da infraestrutura global de referência posicional entre diversos segmentos de usuários espalhados pelo globo (IAG, 2016). O pleno estabelecimento deste sistema engloba o ITRF, o IHRF e o International Gravity Reference System and Frame (IGRS/F) que é um sistema que representa a vertente gravimétrica (Wziontek et al., 2021) e que foi abordado na resolução N° 2 da IAG (Drewes et al., 2016), a qual designou o grupo de trabalho 2.1.1 para desenvolver um conceito para um sistema de referência de gravidade moderno e preciso.

velocidade de variação de precisão a nível de milimétrico.

Diferentemente desse sistema, os sistemas altimétricos não possuem uma superfície de referência unânime em todo o globo, pelo contrário, cada país possui uma superfície de referência altimétrica diferente (Ihde & Sánchez, 2005). Apesar do ITRF fornecer uma componente alti-

métrica de alta precisão, ela não pode ser usada em determinadas finalidades, uma vez que é uma altitude de caráter puramente geométrico. Em trabalhos que envolvem escoamento de fluidos, por exemplo, é necessário o uso de altitudes físicas, que são altitudes que possuem como referência uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra.

Visando estabelecer um referencial que atenda às questões do GGRS, na Assembleia Geral da *International Union of Geodesy and Geophysics* (IUGG) realizada em Praga, em 2015, foi publicada a resolução nº 1, da IAG (Drewes et al., 2016), que dispõe sobre o estabelecimento do IHRS.

O IHRS é um sistema que visa unificar a superfície de referência para a determinação da altitude de todo o globo terrestre. De acordo com Sánchez (2020), a implementação do IHRS requer um conjunto global de estações de referência; a determinação de coordenadas precisas, bem como, suas variações ao longo do tempo (X, \dot{X}, W, \dot{W}) nas estações de referência; padrões, convenções e procedimentos detalhados de forma a garantir que a realização (IHRF) obedeça estritamente a definição (IHRS); e, uma infraestrutura operacional e organizacional que garante o mantimento, a continuidade e a disponibilidade do IHRF a longo prazo.

De acordo com o especificado na resolução IAG nº 1 de 2015 cada estação IHRF deve possuir coordenadas X, Y e Z, vinculada a uma realização do ITRF e, a coordenada vertical, após a primeira realização do IHRF deverá ser expressa em termos de potencial de gravidade. Para tanto, é desejável que exista uma distribuição homogênea de estações gravimétricas em um raio de 210 km ao redor das estações IHRF.

A proposta para a primeira realização do IHRF, até o momento, é de aproximadamente 170 estações distribuídas em todo o mundo, das quais seis delas estão presentes no Brasil nos estados de Fortaleza (CEFT), Mato Grosso (CUIB), Santa Catarina (IMBT), São Paulo (PPTE), Pará (MABA) e outra no Distrito

Federal (BRAZ) (Sánchez et al. 2021).

Por outro lado, detalhes sobre a metodologia para a primeira realização do sistema ainda não está totalmente definida. O cálculo do valor do potencial em pontos presentes na superfície terrestre (W_p) ainda está em fase de conclusão. Um avanço significado foi o chamado Experimento Colorado, na qual vários grupos de pesquisas calcularam valores de potencial de gravidade para uma mesma área teste e com os mesmos dados de entrada, utilizando ferramentas computacionais e procedimentos metodológicos distintos (Wang et al., 2021).

Os requisitos básicos necessários para garantir a consistência nos métodos de cálculo do potencial são (Sánchez et al., 2021):

- Correção do termo de ordem zero que deve ser usado na obtenção da constante gravitacional geocêntrica e do valor W_0 convencional na resolução Nº 1 da IAG (Drewes et al., 2016);
- Alinhamento do centro de massas da Terra com a origem do sistema de coordenadas ITRS/ITRF (sistema no qual serão dadas as coordenadas dos pontos da rede IHRF), por meio da adoção dos coeficientes de primeiro grau assumindo valor zero;
- Restauração dos efeitos atmosféricos, topográficos e elipsoidais, visando corrigir as incertezas causadas pela remoção no Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG);
- As observáveis devem estar no sistema livre de maré durante o cálculo do PVCG e serem convertidas posteriormente para o sistema de maré médio.

Outra grande dificuldade na realização do IHRF, que deverá ser tratada futuramente, é a garantia da usabilidade da rede e sua sustentabilidade a longo prazo. Deve-se assegurar, portanto, que o IHRF seja uma infraestrutura dinâmica que acompanhe as mudanças e que os valores de potencial de gravidade das estações estejam atualizados, prevendo realizações que tragam melhoria ao sistema materializado, assim como há com o ITRF.

GRAVIMETRIA MARINHA

A gravimetria marinha é uma técnica de obtenção do valor de aceleração de gravidade no mar. A mensuração é feita por meio de gravímetros acoplados em navios.

Os dados de aceleração de gravidade marinha são submetidos a erros significativos nos

cruzamentos entre as trilhas, que são causados por problemas instrumentais, por metodologia de aquisição, pelo processamento dos dados após sua aquisição; além de erros inerentes à altitude provocada pela variação dos navios (Lequentrec-Lalancette et al., 2016). Uma saída para eliminar

erros grosseiros é analisando em cada cruzeiro, valores pontuais com relação aos valores de pontos próximos, fixando uma variação máxima permitida. Eliminados estes erros grosseiros, o próximo passo é eliminar os erros nos cruzamentos de trilhas.

Os erros no cruzamento de trilhas realizadas por um mesmo cruzeiro são chamados de diferenças de cruzamento internas (dci). Correspondem a diferenças que podem chegar a dezenas de mGal, o que pode provocar a interpretação de feições que não existem na realidade. Por sua vez os erros no cruzamento de trilhas por cruzeiros diferentes são de diferenças de cruzamento externa (dce), e, podem chegar a valores maiores do que as dci (Vaniček & Kingdon, 2015; Lequentrec-Lalancette et al., 2016).

Os principais motivos para as dci são atribuídos à sensibilidade do equipamento de medição e seu nivelamento durante a coleta dos dados; deriva instrumental; ao equacionamento de problemas ligados ao posicionamento dos navios, o que pode levar a uma correção Eötvös inadequada; e a falta de estações de referência para abertura e fechamento das linhas (Wessel, 1988). Por outro lado, os dados são passíveis de ajustamento permitindo assim eliminar, ou minimizar esses erros.

No que se refere aos repositórios e serviços que mantém e disponibilizam os dados, cabe destacar, a nível global o *Bureau Gravimétrique International* (BGI) que é um serviço pertencente à IAG. Em termos de Brasil, cita-se a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e a Marinha do Brasil.

O BGI tem como objetivo recolher, numa base mundial, medições e informações pertinentes sobre o campo de gravidade terrestre, para compilar e armazená-los em um banco de dados computadorizado para posteriormente redistribuí-los a usuários. Sendo assim, os dados do BGI são resultados de um esforço que reúne várias instituições produtoras de medições de gravidade.

Os dados que o BGI disponibiliza são arquivos com informações de latitude, longitude, altitude, gravidade e anomalias de gravidade ar livre e Bouguer. Essas informações de anomalias de gravidade são calculadas sobre o geóide, portanto, não levam em consideração dados de batimetria.

Além desse arquivo, é fornecido também um

arquivo que contém informação do nome da trilha, ano de medição, quantidade de pontos, a fonte de levantamento dos dados e grade da localidade do levantamento.

Outra fonte de dados utilizados nesta pesquisa foi da Marinha do Brasil. Tais dados são obtidos pelo Grupo de Trabalho para Acompanhamento da Proposta do Limite Exterior da Plataforma Continental Brasileira (GT LEPLAC) que foi instituído pela portaria Nº 330/MB, de 15 de dezembro de 2005. Foi criado para acompanhar a evolução do processo de análise da proposta de Limite Exterior da Plataforma Continental Brasileira, até que o referido limite (além de 200 milhas) fosse estabelecido pelo Brasil com base nas recomendações da CLPC, conforme previsto no § 8 do art. 76 da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM) (Mohriak & Torres, 2017).

A primeira etapa de levantamentos (LEPLAC fase 1) produziu mais de 92 mil quilômetros de perfis gravimétricos, essa etapa foi realizada entre os anos de 1987 e 1996, ao longo da margem continental até uma distância do litoral de aproximadamente 350 milhas. Posteriormente, com início no ano de 2008, foi realizado um novo levantamento (LEPLAC fase 2) que contou com mais de 81 mil quilômetros de perfis gravimétricos (Marinha do Brasil, 2020). Os dados que são da Marinha do Brasil contêm a trilha de medição, a posição em coordenadas geodésicas e UTM, além das anomalias Ar livre e Bouguer.

Os dados de gravidade marinha são classificados como dados não sísmicos pela ANP. Esses dados não sísmicos são definidos como dados provenientes de tecnologias geofísicas distintas do método sísmico, por exemplo, gravimetria, magnetometria, gamaespectrometria (ANP, 2021).

Nos dados de gravimetria marinha disponibilizados pela ANP são aplicadas as correções Eötvös e da gravidade normal, que por sua vez, são correções aplicadas devido à variação sofrida pela gravidade de acordo com a latitude, que é influenciada pela força centrífuga causada pelo efeito de rotação da Terra, e da distribuição irregular de massa no planeta. O arquivo de dados contém informações de trilha, identificador, coordenadas de posição geodésicas e UTM, batimetria, anomalias free air e Bouguer e correção do terreno.

SATÉLITES ALTIMÉTRICOS

A altimetria por satélite foi desenvolvida para auxiliar nas investigações referentes à definição

da forma da Terra. Trata-se de uma técnica que facilita a realização de medidas nos oceanos,

camadas de gelo, rios e lagos, o que é difícil e oneroso se feito por meio terrestre. Inicialmente, essa técnica foi desenvolvida com o objetivo de monitorar os oceanos, entretanto a grande quantidade de dados gerados para áreas continentais viabilizou a realização de estudos relativos à variação espacial e temporal do volume de água em rios e lagos (Pereira et al., 2017).

O uso de um radar em órbita permite medir com precisão a topografia dos oceanos, que é aproximadamente uma superfície equipotencial (Sandwell et al., 2021). Estas medições são realizadas por radares que são acoplados nos satélites.

Os dados derivados da altimetria por radar a bordo de satélite apresentam aplicações em diversas áreas como a dinâmica dos oceanos, a variação do nível dos mares em larga escala, a construção de séries históricas, os estudos de fenômenos naturais globais (Pereira et al., 2017) e, também, pode ser aplicado na Geodésia e na Geofísica devido aos produtos de anomalias de gravidade gerados nos levantamentos.

Há vários modelos gravimétricos derivados por radar a bordo de satélites altimétricos. Os dados utilizados nesta pesquisa são dados do modelo GRAV31.1 de Sandwell et al. (2021) e do modelo DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020).

O GRAV31.1 é uma atualização do modelo

GRAV_24.1 que foi derivado de dados dos satélites Cryo-Sat-2 e Jason-1 que contribuíram com mais de 70 meses de dados, atingindo uma precisão global de aproximadamente 2mGal (Sandwell et al., 2021). A sua concepção tem como elipsoide de referência o GRS80. Os dados do modelo GRAV31.1 podem ser encontrados em UCDS (2021).

Por sua vez, o DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020) é um modelo de anomalias de gravidade ar livre gerado a partir de 7 anos de dados do satélite Cryosat-2, 1 ano de dados do satélite Jason-1 e 1 ano de dados do satélite Saral/Altika, que foi um satélite que começou a realizar mensurações a partir de 2016. A precisão global aproximada destes dados é de 2mGal (Andersen, 2018).

O DTU Space fornece vários outros modelos gravimétricos globais derivados de satélites altimétricos, além de modelos Globais de Batimetria (DTU Batimetry), Modelos Globais de Marés oceânicas (DTU Global Ocean Tide Model), Modelos da Topografia Dinâmica do Mar (DTU Mean Dynamic Topography) e Modelos Globais da Superfície Média do Mar (DTU Ocean wide Mean Sea Surface). Fornece também estimativas do nível do mar e dados do nível do mar Ártico. Esses produtos podem ser encontrados em DTU (2021). Também é possível obter os erros associados aos modelos.

DADOS UTILIZADOS

A metodologia de análise dos dados de gravimétricos marinhos foi desenvolvida a partir dos dados que envolvem as duas estações IHRF litorâneas. As estações fazem parte da rede SIRGAS-CON, o qual trata-se da densificação do *International GNSS Service* (IGS) na América Latina. Foram utilizadas três fontes de dados de gravimetria marinha, BGI (BGI, 2021), Marinha do Brasil (Marinha do Brasil, 2020) e ANP (ANP, 2021). Tais dados estão representados espacialmente na Figura 2.

Todos esses dados expostos na Figura 2 foram selecionados de acordo com a grade de trabalho, que foi estipulada visando o recobrimento do raio de 210 km ao redor do ponto estudado. A Tabela 1 apresenta a quantidade de pontos disponíveis para as estações de estudo de acordo com a fonte de dados.

Os dados BGI utilizados nesta pesquisa, foram levantados entre os anos de 1939 a 1989 e, são das seguintes fontes: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Institute

of Geophysics and Planetary Physics, Projeto NAVOCEANO, Lamont Doherty Geological Observatory, Woods Hole Oceanographic Institution, USGS Branch of Pacific Marine Geology, Vening-Meinez Laboratory for Geophysics and Geochemistry, Netherlands Geodetic Commission, Institute of Oceanographic Sciences, Institution IFZ AN SSSR, SCRIPPS Institution of Oceanography, Institute of Geodesy Buenos Aires, Ifremer GEODAS, United Kingdom Hydrographic Department, USSR Data From B.G.I. Ao todo foram usadas 19 trilhas para a estação CEFT e 8 trilhas para a estação IMBT.

Os dados fornecidos pela Marinha do Brasil foram levantados em conjunto pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN), Empresa Brasileira de Petróleo S.A. (PETROBRAS) e Comunidade Científica Brasileira. Ao todo correspondem à um conjunto de 48.570 trilhas ao redor da estação CEFT e 92.837 trilhas em torno da estação IMBT, considerando as duas fases de levantamento.

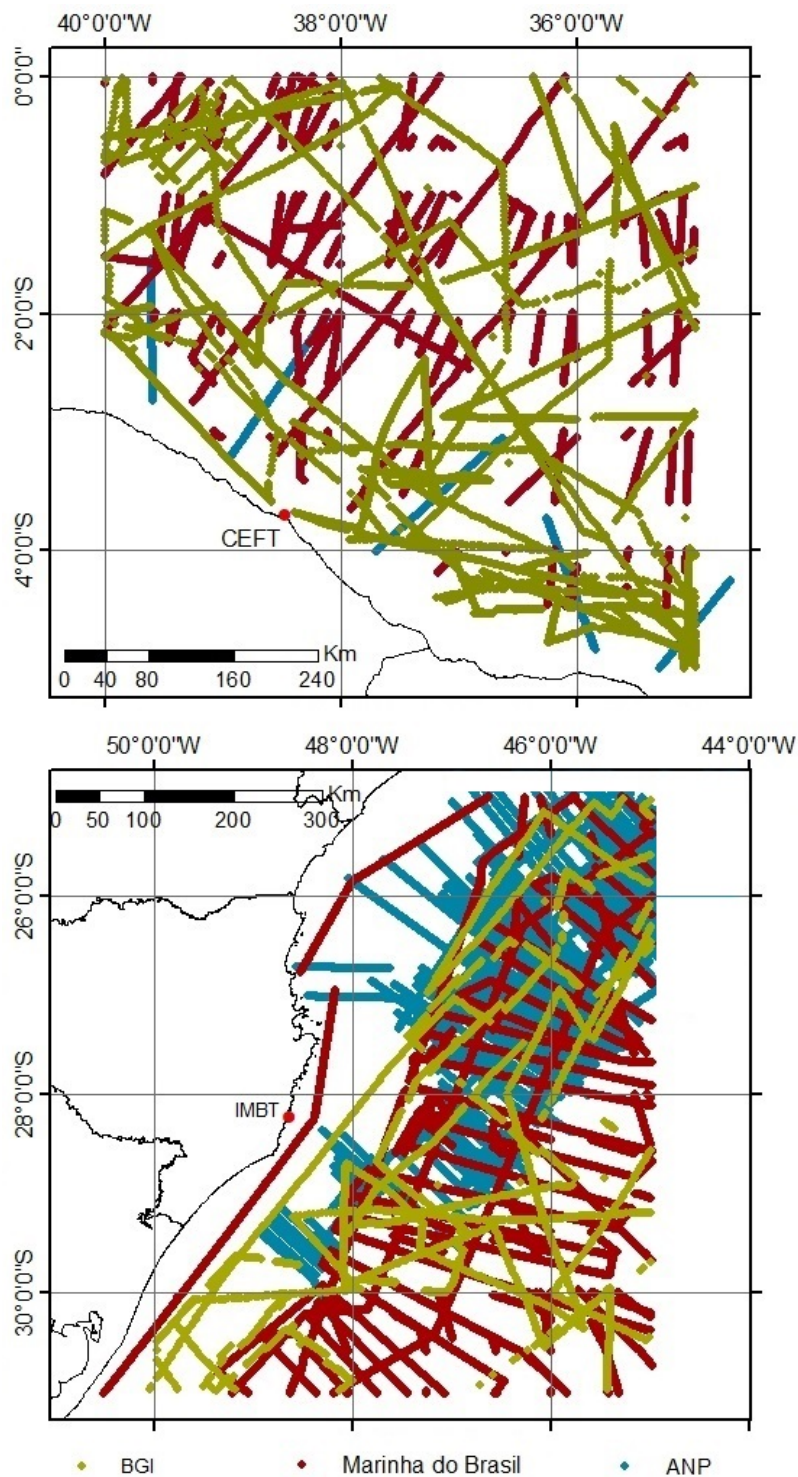


Figura 21 – Dados de gravidade marinha, disponibilizados pelo BGI, Marinha do Brasil e ANP.

Tabela 1 - Quantidade de pontos

	CEFT	IMBT
BGI	5764	2784
Marinha do Brasil	110197	78395
ANP	4637	187170

Por fim, os dados ANP se distribuem por 5 trilhas na região da estação CEFT e 131 trilhas na estação IMBT.

Os dados do modelo GRAV31.1 foram disponibilizados pela *University of California San*

Diego para a região desejada. E os dados DTU17 foram fornecidos pelo *National Space Institute at the Technical University of Denmark*. O modelo GRAV31.1 possui dados distribuídos em uma grade regular de 1' x 1', o modelo DTU17, além

da grade de 2' x 2' também disponibiliza uma grade regular de 1' x 1', porém, nesta pesquisa

foi aplicada a grade de 1 arcminutes para padronizar com os dados do modelo GRAV31.1.

PROCESSAMENTO DOS DADOS

O foco desta pesquisa foi o tratamento e análise dos dados de gravidade marinha. Para tanto, esses dados foram comparados com dados provenientes de um modelo de gravidade global.

Por causa da diferença na distribuição espacial dos dados, no processo de comparação foram testados diferentes métodos de interpolação e, por causa da diferença entre referenciais e métodos de obtenção e geração dos dados, foram desenvolvidas rotinas computacionais em linguagem Matlab.

Tais rotinas calcularam o ajuste dos dados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ),

no qual foram aplicados modelos funcionais desenvolvidos de acordo com cada método de análise, e posterior comparação, para detecção e eliminação de *outliers*. Essas comparações foram aqui denominadas desvio padrão, área, linear e média. Denker & Roland (2003) também desenvolveram um modelo para estimar o viés de trilhas por um procedimento padrão de ajuste por Mínimos Quadrados e obtiveram resultados satisfatórios, corroborando com o método desenvolvido nesta pesquisa. A Figura 3 esquematiza as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

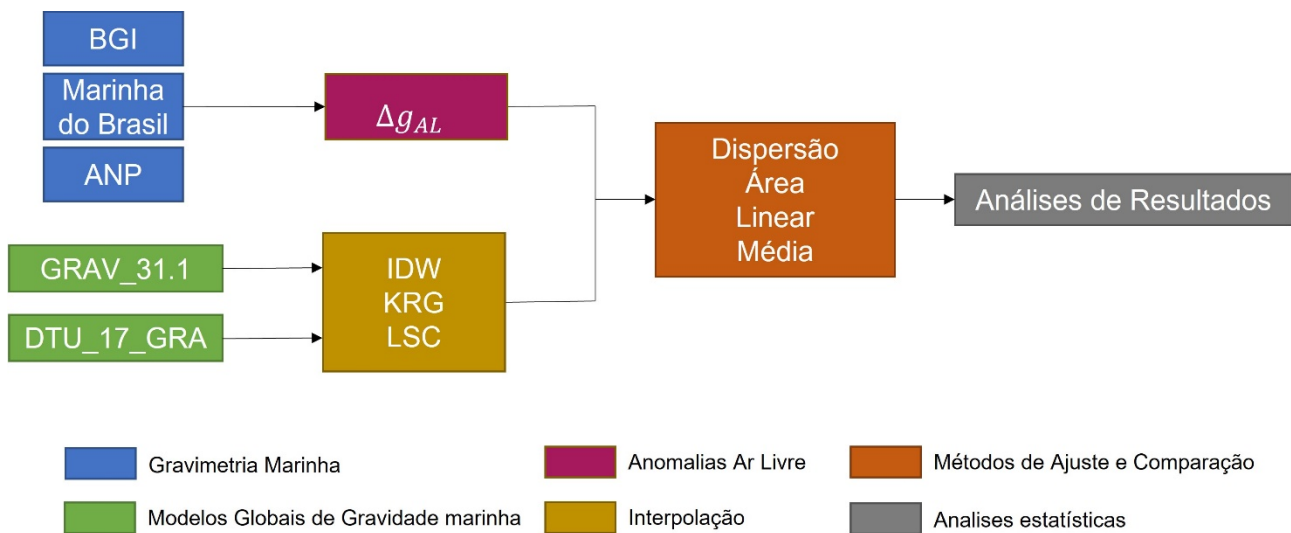


Figura 32 - Etapas de desenvolvimento da pesquisa. Nela, IDW corresponde à sigla Inverse Distance Weighted, KRG é a abreviação de Krigagem e LSC é a sigla de Least Squares Collocation. Δg_{AL} significa anomalia de gravidade ar livre.

O cálculo da anomalia ar livre foi realizado por meio de rotinas desenvolvidas seguindo a Equação 1.

$$\Delta g_{AL} = g + C_{At} + C_{AL} - \gamma \quad (1)$$

onde Δg_{AL} corresponde à anomalia de gravidade Ar livre, g a gravidade no ponto, C_{At} a correção atmosférica (2) (Marotta & Vidotti, 2017), C_{AL} a correção ar livre (3) e γ a gravidade teórica (4).

$$C_{At} = 0,8658 - 9,727 \cdot 10^{-5} \cdot H + 3,482 \cdot 10^{-9} H^2 \quad (2)$$

onde H é altitude ortométrica. Nesta pesquisa foi adotado $H = 0$ visando reduzir os cálculos para o geoide. Devido ao fato de não se conhecer as incertezas das medidas de gravidade marinha não é possível obter o erro provocado por esta redução. Também não foram considerados o valor da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) por essa não ser conhecida para a estação de Fortaleza.

A correção ar livre é dada pelo gradiente da vertical da gravidade ($\frac{\partial \gamma}{\partial h}$). O seu cálculo está descrito pela Equação 3 (Heiskanen & Moritz, 1967).

$$C_{AL} = \frac{\partial \gamma}{\partial h} H = 0,3086 H \quad (3)$$

A gravidade teórica em uma altitude elipsóidica (h) do ponto P , que determinada de forma rigorosa, é calculada pela Equação 4.

$$\gamma(h) = \gamma - \frac{2\gamma_e}{a} (1 + f + m - 2f \sin^2 \varphi) h + 3 \frac{\gamma_e}{a} h^2 \quad (4)$$

onde γ pode ser obtido via Teorema de Clairaut (5) ou pela fórmula Somigliana (6); γ_e corresponde à gravidade normal no equador; a o semieixo maior do elipsoide; f o achatamento do elipsoide; m é a relação da força centrífuga por unidade de massa pela gravidade normal no equador dada por (7); e φ é a latitude do ponto P .

$$\gamma = \gamma_e (1 + \beta \sin^2 \varphi + \beta' \sin^2 2\varphi) \quad (5)$$

onde β e β' são coeficientes do campo de gravidade normal adotados em uma assembleia da IAG, realizada em Estocolmo em 1930, e assumem valor de $\beta = 0,0052884$ e $\beta' = -0,0000059$ respectivamente (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2006).

$$\gamma = \frac{a\gamma_e \cos^2 \varphi + b\gamma_p \sin^2 \varphi}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (6)$$

onde γ_p corresponde ao módulo da gravidade normal e b ao semieixo menor do elipsoide.

$$m = \frac{a\omega^2}{\gamma_e} - \frac{3}{2} m^2 \quad (7)$$

onde ω é a magnitude de velocidade de rotação da Terra.

As constantes aplicadas nas formulações anteriores, referentes ao elipsoide GRS80 estão apresentados na Tabela 2 (Moritz, 2000).

Tabela 2 - Constantes do elipsoide GRS80

Constantes	GRS80
a	6.378.137 m
b	6.356.752,3141 m
f	1:298,257
ω	7 292 115 x 10 ⁻¹¹ rad/s
m	0,003 449 894
γ_e	978.032.677,15 Gal
γ_p	983. 218.636,85 Gal

Sabe-se que, ao se utilizar $H = 0$ a Equação 3 torna-se uma constante e assim, a Equação 4 assume valor zero, tornando suas aplicações inutilizadas. Porém optou-se por manter tais equações visando esclarecer o fato de a correção ar livre ter sido aplicada e visando um processo futuro, onde possa ser necessário a considerar valores para H , o seu cálculo já esteja implementado.

Como os dados dos modelos globais de gravidade marinha usados foram disponibilizados em grade regular de 2'x 2', foi necessário, para ajuste e comparação, obter as informações desses modelos para os valores pontuais de gravidade marinha utilizados nesta pesquisa.

Para isso, foram utilizados quatro interpoladores para análise de desempenho dos mesmos e verificação do método de interpolação que apresentou melhor desempenho. Os métodos aplicados foram o *Inverse Distance Weighted* (IDW), *Kriging* e *Least Squares Collocation* (LSC) aplicada por rotinas do pacote GRAVSOF, no qual a função covariância foi dada pela Equação 8 (Forsberg & Tscherning, 2008).

$$C = C_0 (1 + \alpha s) e^{-\alpha s} \quad (8)$$

onde s é a distância e α um parâmetro que determina o comprimento de correlação. A variância C_0 é determinada automaticamente, dependendo do comprimento de correlação indicado. Nesta pesquisa foram testados os seguintes valores: 5 km, 10 km, 20 km, 50 km e 100 km. Com isso,

verificou-se que a partir de 10 km os valores não alteravam os resultados, podendo ser explicado pelo fato desse comprimento útil depender do espaçamento dos dados, determinando, portanto, o comprimento de correlação de colocação.

Com o cálculo das anomalias de gravidade ar livre e as interpolações realizadas, foi possível aplicar as metodologias de análise dos dados. No total, foram desenvolvidas quatro metodologias para eliminar os dados discrepantes (*outliers*) e outras três, que além de eliminar os *outliers*, fazem a correção da deriva espacial.

As metodologias que eliminam os dados discrepantes foram consideradas como métodos de comparação, neles foram aplicados testes estatísticos para a detecção de *outliers*, porém, o ajuste aos dados de referência não foi realizado. Já as metodologias que além de eliminar os *outliers* fazem a correção da deriva espacial foram consideradas como métodos de ajuste, nos quais foram aplicados os mesmos cálculos dos métodos de comparação, porém foi realizado o ajuste dos dados de gravimetria marinha aos do modelo global, corrigindo assim a deriva espacial. A seguir estão apresentadas as descrições desses métodos aplicados.

- Comparação pela dispersão: esse método utiliza como parâmetro pontos contidos a uma distância preestabelecida, adotada nesta pesquisa foi usada 10km, visto que foi a distância usada no método LSC, e dentro desse raio, o método

calcula o desvio padrão dos pontos. Com isso, tomando esse desvio padrão como referência e utilizando 99,7% de confiança, os valores de anomalia de gravidade que apresentam valores superiores ao desvio padrão calculado são considerados *outliers* e consequentemente eliminados. Em outras palavras, elimina os pontos discrepantes de acordo com o desvio padrão calculado, contidos na distância arbitrada inicialmente. Essa análise de desvio padrão foi realizada ponto a ponto considerando o raio pré-estabelecido.

- Comparação e ajustes pela média: Esse método realiza o ajuste de observações por meio do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), seguindo modelo funcional apresentado na Equação 9. Para isso, foram utilizados os dados de anomalia de gravidade dos pontos, considerados dados observados, e do modelo global, considerados dados de referência. Após o ajuste, foram calculados os resíduos e os desvios padrão dos resíduos, permitindo o cálculo do Resíduo Padronizado (RP) e aplicação do teste TAU para verificação e

$$F(x) = a + b \cdot \cos(lat) \cos(lon) + c \cdot \cos(lat) \sin(lon) + d \cdot \sin(lat) \quad (11)$$

onde a refere-se ao parâmetro que representa o valor médio das diferenças entre valores calculados e valores tomados como referência; b, c, d são parâmetros de translação que representam o ajuste em área com relação à latitude e longitude.

O valor calculado corresponde a anomalia de gravidade dos pontos de gravimetria marinha e o valor de referência a anomalia de gravidade extraída do modelo global GRAV31.1 (Sandwell et al., 2021) e do DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020).

O teste TAU, pelo método de Pope (Pope, 1976), corresponde a um teste estatístico que se aplica ao Resíduo Padronizado (RP) para determinar se uma observação possui um valor discrepante. Nesse método foi calculado um valor RP para cada observação (na pesquisa corresponde ao resíduo entre a anomalia calculada e a anomalia do modelo global) e comparado com o Tau tabelado (Tau crítico τ_c) determinado pelo grau de liberdade e de confiança. Se o valor do

eliminação de pontos considerados *outliers*.

$$F(x) = a \quad (9)$$

onde a corresponde a diferenças entre valores calculados de anomalias de gravidade marinha (x) e os valores tomados como referência para cada trilha.

- Comparação e ajustes em linha: Esse método, assim como o anterior, realiza o ajuste de observações por meio do MMQ, envolvendo o modelo funcional apresentado em (10), verifica e elimina os pontos considerados *outliers*.

$$F(x) = a + b \cdot x \quad (10)$$

onde a e b são parâmetros que representam o valor médio das diferenças e a tendência linear, respectivamente, entre valores calculados e os valores tomados como referência para cada trilha.

- Comparação e ajustes em área: este método é similar aos dois últimos métodos apresentados, porém, considera o seguinte modelo funcional (Sansò & Sideris, 2013):

resíduo padronizado for maior que Tau tabelado, a observação é considerada um *outlier*. O valor de RP é calculado a partir da seguinte equação:

$$RP_i = \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} \quad (12)$$

onde, V_i é o resíduo para a observação i e σ_{v_i} é o desvio padrão do resíduo para a observação i .

Neste teste a hipótese nula é dada por (Pope, 1976):

$$H_0: \frac{v_i}{\sigma_{v_i}} < \tau_c \quad (13)$$

Assim, nesta pesquisa, usando o teste Tau, a anomalia gravimétrica foi considerada um *outlier*, quando o RP calculado para o valor da anomalia gravimétrica marinha após ajuste pelo MMQ foi maior que o Tau crítico a 95% de confiança. Por consequência, o valor foi eliminado e um novo ajustamento foi realizado.

Para validar os resultados foram calculados os parâmetros da estatística descritiva e realizada também a análise espacial dos valores gerados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na pesquisa estão apresentados nesta seção e foram separados em tópicos de acordo com a fonte dos dados, no que tange aos dados de gravimetria marinha. Para cada fonte de dados foram obtidas as soluções

dispostas na Tabela 3.

Gravimetria marinha fornecida pelo BGI

A análise da adequação dos dados de gravimetria marinha por BGI com os modelos globais de gravidade foi feita sobre a discrepância

Tabela 3 - Soluções obtidas no trabalho

Modelo	Método	Interpolação		
DTU17 - GRA	Dispersão	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Área	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Linear	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Média	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
GRAV_31.1	Dispersão	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Área	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Linear	IDW	<i>Kriging</i>	LSC
	Média	IDW	<i>Kriging</i>	LSC

calculada entre os dados do BGI com os modelos GRAV31.1 (Sandwell et al., 2021) e DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020). A Figura 4 apresenta o desvio padrão das diferenças entre os valores de anomalia de gravidade marinha,

estimados a partir dos dados disponibilizados pelo BGI e o modelo GRAV31.1 e para também o modelo DTU17 para cada método de análise desenvolvido para as estações CEFT e IMBT.

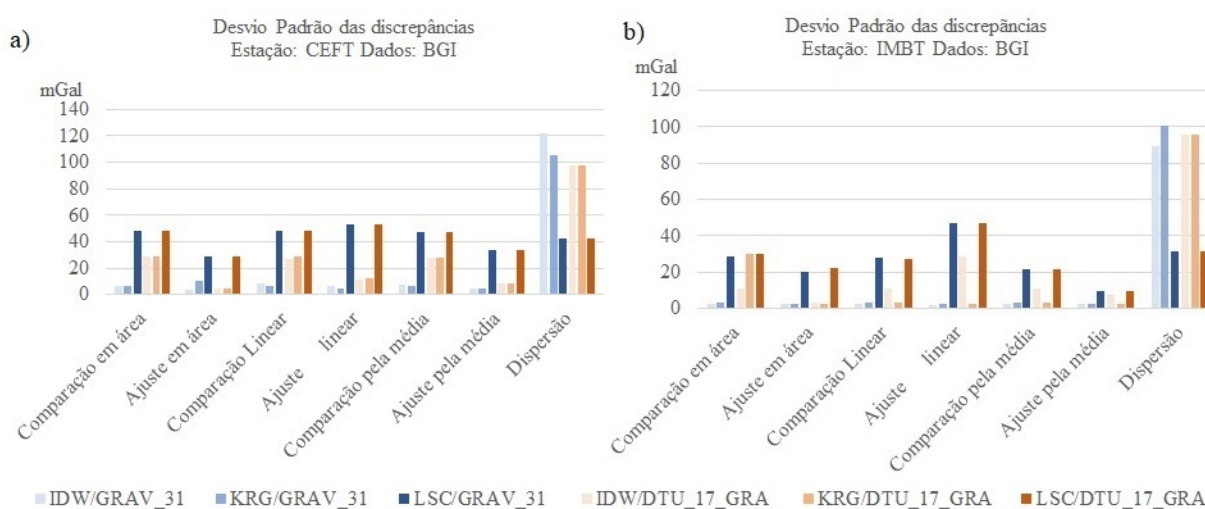


Figura 4 - Desvio padrão das diferenças entre os dados BGI com o modelo GRAV31.1 e o modelo DTU17. Em a) estão apresentados os desvios padrão para a estação CEFT e em b) para a estação IMBT.

Por meio do gráfico foi possível notar que o método de interpolação LSC apresentou os resultados mais dispersos em relação à média das diferenças, que os demais métodos de interpolação, em contrapartida o método *Kriging* apresentou os menores desvios padrão.

O método de análise pela dispersão apresentou uma grande variabilidade nos resultados, se mostrando inadequado para os dados em estudo. Por sua vez, o método de ajuste em área apresentou os menores desvios padrão em relação à média das discrepâncias entre os modelos globais de gravidade e os dados de anomalias de gravidade marinha. O modelo GRAV31.1 apresentou na maioria das situações valores de dispersão mais consistente do que o modelo DTU17.

Sendo assim, é afirmativo o fato que os resultados apresentados pelo método de análise ajuste em área foram mais consistentes, aplicando o método de interpolação *Kriging* juntamente com o modelo GRAV31.1, para os dados do BGI. O fato de o método de interpolação *Kriging* ter

apresentado melhor performance não é surpreendente, trabalhos como de Santana et al. (2017) e Montecino et al. (2014) mostram que o método é corriqueiramente usado na área de geociências e que apresenta bons resultados em estudos geodésicos.

Assim, considerando o método de análise de ajuste em área, o método de interpolação *Kriging* e o modelo GRAV31.1, para a estação CEFT, 98,21% dos dados apresentaram resultados satisfatórios, e, para a estação IMBT 96,98% foram considerados dados consistentes.

Desta forma, foi gerada a Figura 5 que esquematiza a distribuição espacial das discrepâncias entre os dados do BGI e o modelo global GRAV31.1, geradas pelo método de análise de ajuste em área, usando a interpolação *Kriging*, para a estação CEFT e IMBT. Tais discrepâncias são as diferenças entre as anomalias de gravidade validadas pelo método de análise ajuste em área e as anomalias fornecidas pelo modelo global GRAV31.1.

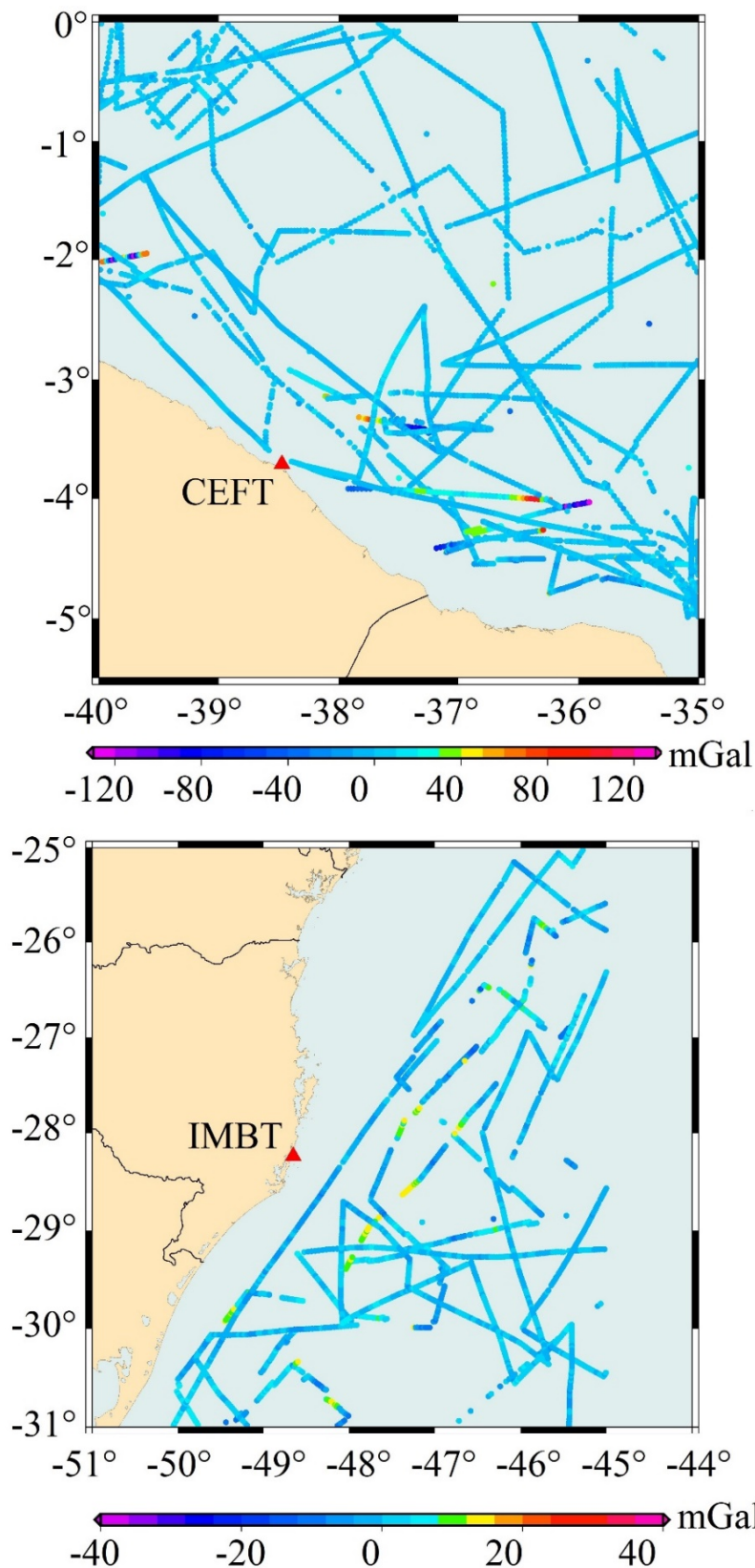


Figura 5 - Discrepância entre os dados BGI e o modelo GRAV31.1 pelo método de análise ajuste em área e interpolação *Kriging*.

Especialmente foi possível notar que as maiores discrepâncias para a estação CEFT encontram-se concentradas em 5 trilhas de medição. Na estação de IMBT as discrepâncias foram menores em relação a CEFT e estão distribuídas homogênea-

buição dessas discrepâncias está representada na Figura 6 para a estação CEFT e IMBT. Estas discrepâncias são as diferenças entre as anomalias de gravidade validadas pelo método de análise ajuste em área e as anomalias fornecidas pelo modelo global GRAV31.1.

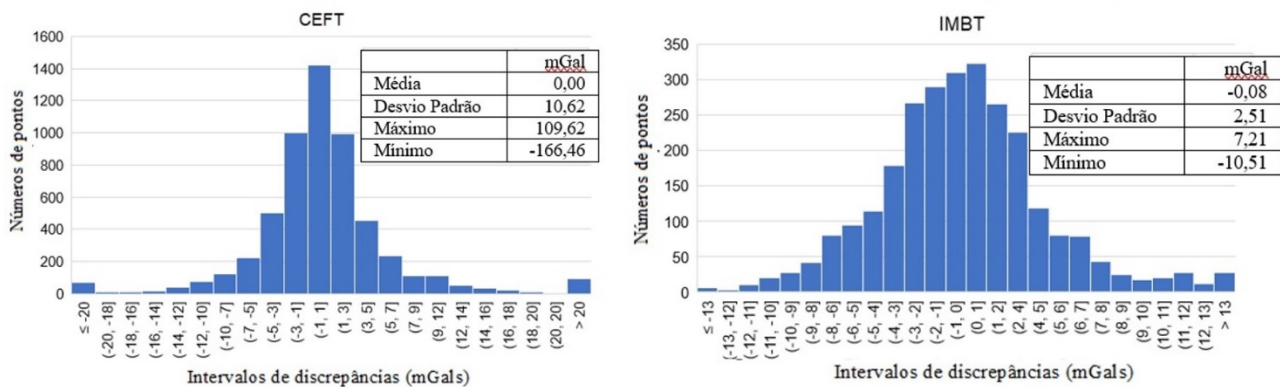


Figura 6 - Histograma de distribuição das discrepâncias entre os dados BGI e o modelo GRAV31.1 pelo método de análise ajuste em área e interpolação *Kriging*.

As discrepâncias analisadas seguem uma distribuição normal tanto para a estação CEFT quanto para a estação IMBT. Os dados para a estação CEFT apresentaram maiores valores de discrepância que para a estação de IMBT, isso pode estar relacionado com a topografia oceânica a qual possui variação mais suave na região de IMBT do que na região de CEFT. Outro fato que justifica essas discrepâncias são as incertezas que os satélites apresentam nas medidas próximas à costa devido ao efeito de borda e mudança de densidade (terra / água). Portanto, esses maiores valores de discrepâncias podem estar associadas ao modelo global de gravidade marinha, uma vez que os dados desses modelos foram usados para a

validação dos testes desenvolvidos nesta pesquisa. **Gravimetria marinha fornecida pela Marinha do Brasil**

O desvio padrão das discrepâncias entre as anomalias de gravidade dos dados de gravimetria marinha fornecida pela Marinha do Brasil (Marinha do Brasil, 2020) com os modelos globais GRAV31.1 (Sandwell et al., 2021) e DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020) para cada método de análise desenvolvido para as estações CEFT e IMBT estão representados na Figura 7. Nela o eixo das ordenadas representa este desvio padrão em mGal para os diferentes métodos de análises desenvolvidos, os quais estão expostos no eixo das abscissas.

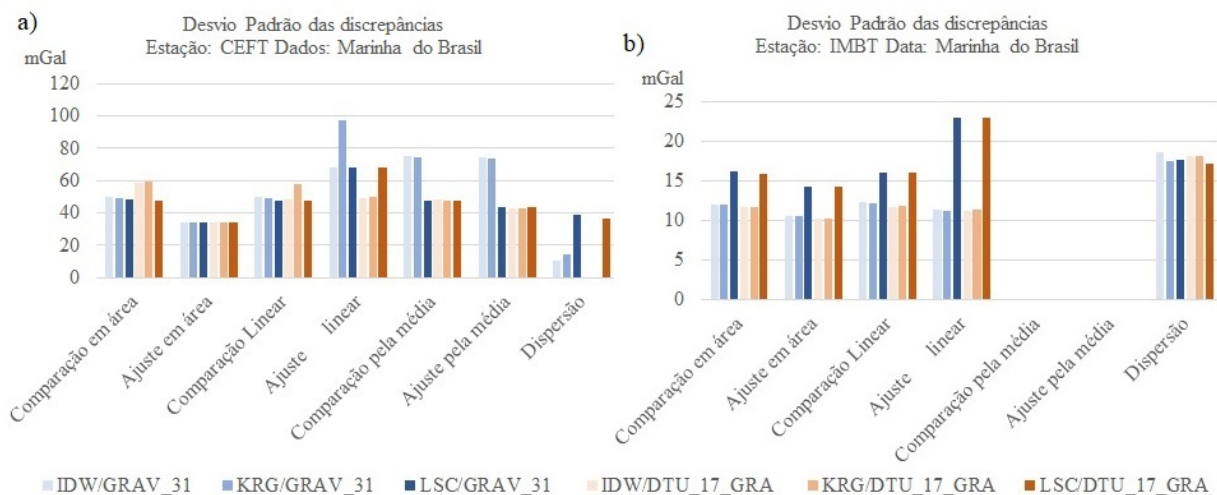


Figura 7 - Desvio padrão das diferenças entre os dados da Marinha do Brasil com o modelo GRAV31.1 e o modelo DTU17. Em a) estão os desvios padrão para a estação CEFT e em b) para a estação IMBT.

Analisando as informações apresentadas na Figura 7, foi possível verificar grande variabilidade dos resultados para os diferentes métodos de interpolação e de comparação e ajuste. Para alguns métodos de comparação e ajuste não foram apresentados resultados pelo fato de todas as informações terem sido consideradas *outliers* por meio da técnica adotada. Dentre esses métodos de análise, o método de ajuste em área apresentou

as menores discrepâncias. Cabe destaque o fato de que os dados de gravimetria marinha levantados pela Marinha do Brasil tiveram por objetivo a exploração e aproveitamento dos recursos naturais, portanto, não são dados de cunho geodésico, o que pode explicar tais discrepâncias.

O modelo DTU17 apresentou menores discrepâncias para os dados da Marinha do Brasil em comparação ao modelo GRAV31.1. Os resul-

tados provenientes do método de interpolação *Kriging* apresentaram ligeiramente menor discrepância em torno da média, mas não representa o melhor resultado, isso porque os métodos de comparação e ajuste validaram poucos pontos. A estação de IMBT por exemplo, para o método de ajuste em área com o modelo DTU17, de um total 78.395 pontos, foram eliminados 78.030 pontos, ou seja, apenas 0,47% dos dados apresentaram resultados satisfatórios, o que torna inviável seu uso. Esse fato justifica uma menor discrepância dos valores para estação de IMBT quando comparados com os dados do BGI.

A Figura 8 representa as discrepâncias entre os dados fornecidos pela Marinha do Brasil e o modelo DTU_17, pelo método ajuste em área resultante da interpolação *Kriging*. Nessa, foi possível observar a pouca quantidade de pontos na estação de IMBT que não foram considerados *outliers* pelo método de ajuste analisado. Não há um padrão de distribuição das maiores discrepâncias para a estação CEFT. Tais discrepâncias são as diferenças entre as anomalias de gravidade validadas pelo método de análise ajuste em área e as anomalias fornecidas pelo modelo global DTU17.

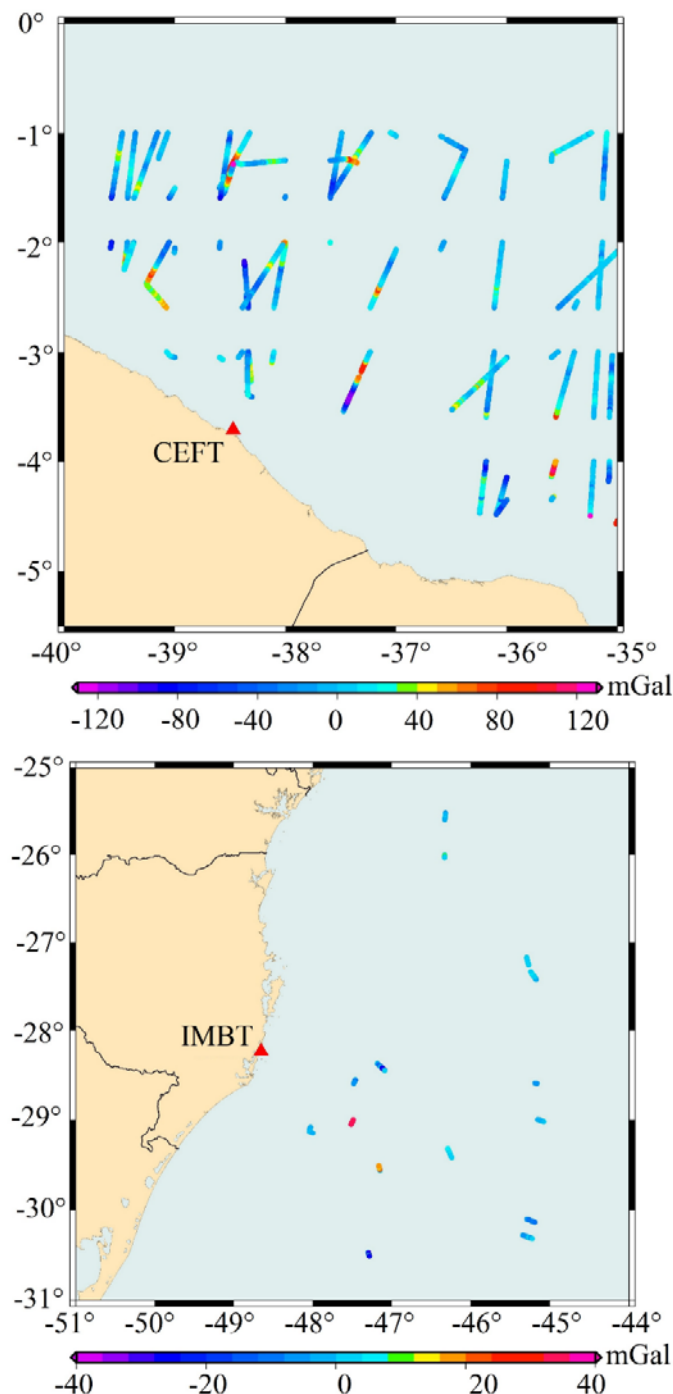


Figura 8 - Discrepância entre os dados da Marinha do Brasil e o modelo DTU17 pelo método de análise ajuste em área e interpolação *Kriging*.

O histograma de distribuição destas diferenças entre as anomalias de gravidade dos dados da Marinha do Brasil e o modelo DTU17, depois

de aplicados o ajuste em área nos dados interpolados pelo método *Kriging* está apresentado na Figura 9.

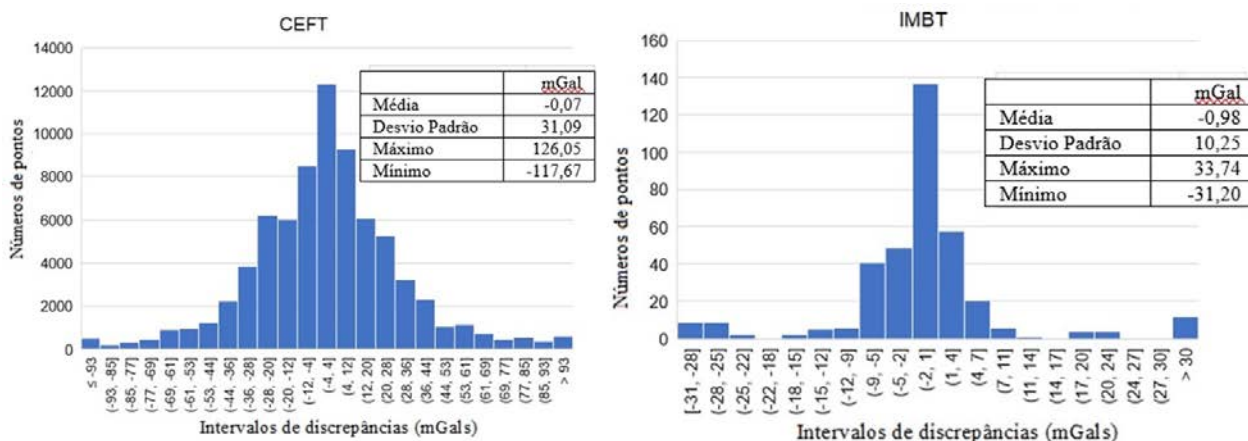


Figura 9 - Histograma de distribuição das discrepâncias entre os dados da Marinha do Brasil e o modelo DTU17 pelo método de análise ajuste em área e interpolação *Kriging*.

O histograma evidencia que as discrepâncias para as estações CEFT seguem distribuição normal em torno da média. No histograma, é possível notar que foram validados maior quantidade de dados para a estação CEFT e conseqüentemente maior amplitude nas discrepâncias. É evidenciado também que para a estação IMBT, apesar dos dados seguirem distribuição normal há maior concentração dos valores nos intervalos extremos, fato que não foi constatado nos dados do BGI.

Gravimetria marinha fornecida pela ANP

Assim como, para as demais fontes de dados foram geradas discrepâncias entre os dados fornecidos pela ANP (ANP, 2021) e os modelos globais GRAV31.1 (Sandwell et al., 2021) e DTU17 (Andersen & Knudsen, 2020) para todos os métodos de ajuste e comparação, além dos

métodos de interpolação analisados. A Figura 10 evidencia o desvio padrão destas discrepâncias. No eixo das ordenadas estão a variação das discrepâncias em mGals e no eixo das abscissas os diferentes métodos desenvolvidos.

A Figura 10 evidencia que, tanto para a estação CEFT quanto para a estação IMBT, o método de interpolação por LSC apresentou as menores discrepâncias. O método de comparação por desvio padrão não apresentou resultados, uma vez que o método considerou todos os dados como *outliers*. Entre os modelos globais analisados, o GRAV31.1 apresentou menores desvios padrão em comparação ao modelo DTU17. O método de ajuste em área apresentou resultados mais consistentes entre os métodos de comparação e ajuste analisados.

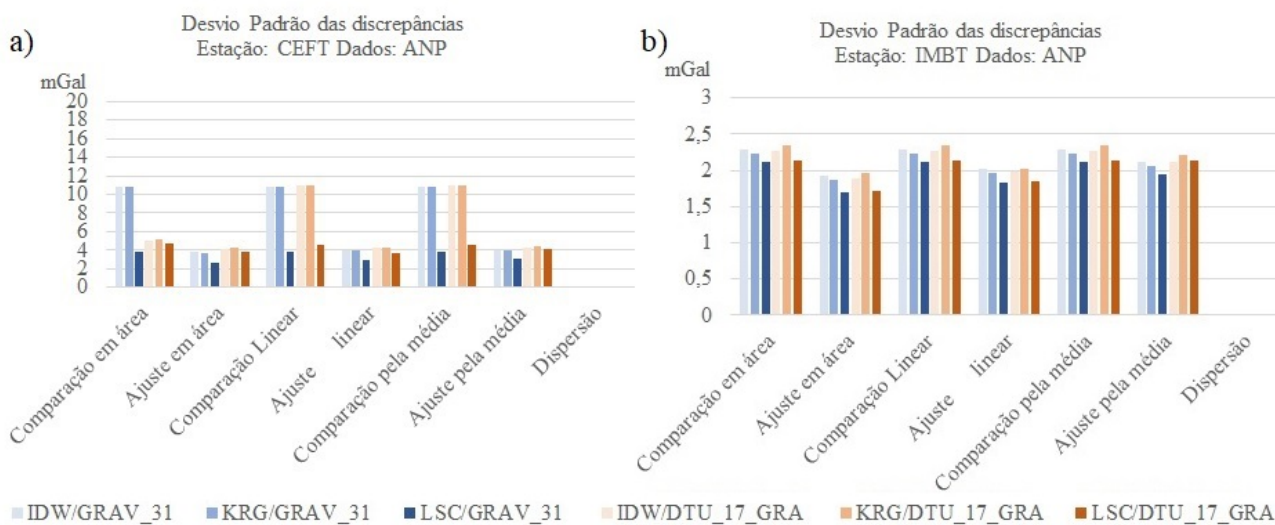


Figura 10 - Desvio padrão das diferenças entre os dados ANP com o modelo GRAV31.1 e o modelo DTU17. Em a) estão os desvios padrão para a estação CEFT e em b) para a estação IMB.

Considerando as condições que apresentaram resultados mais consistentes, sendo elas modelo GRAV31.1, método de ajuste em área e interpolação LSC, para a estação CEFT, 98,21%

dos dados foram satisfatórios, e, para a estação IMBT este valor foi de 92,33%. A Figura 11 mostra a distribuição espacial desses pontos e suas discrepâncias representadas por cores.

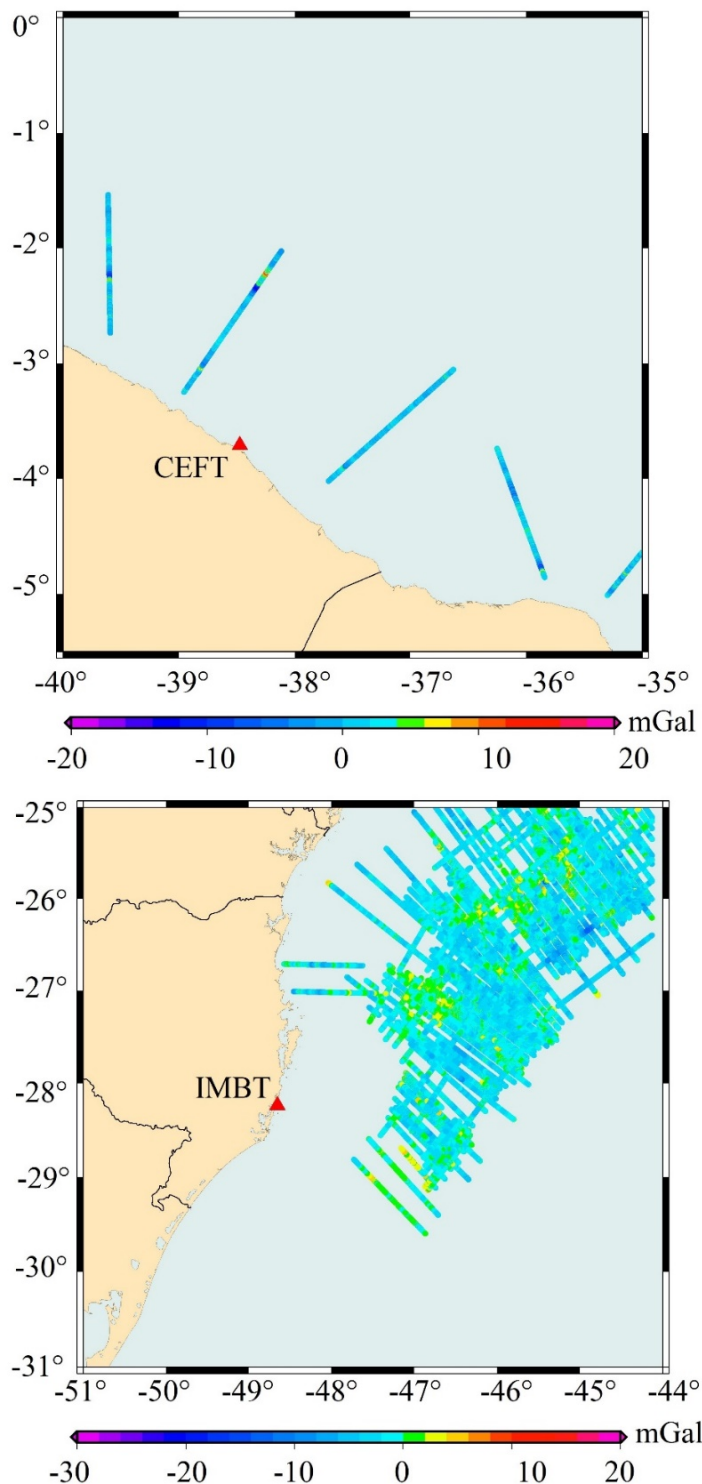


Figura 11 - Discrepância entre os dados da ANP e o modelo GRAV31.1 pelo método de análise ajuste em área e interpolação LSC.

Foi possível perceber que para as duas estações estudadas, as discrepâncias estão distribuídas homogeneamente entre os pontos.

A distribuição das diferenças entre os dados da ANP e o modelo GRAV31.1, ajustados em

área e interpolados pelo método LSC está representada no histograma esquematizado na Figura 12, no qual foi evidenciado o número de pontos e os intervalos de discrepâncias no eixo das ordenadas e das abscissas respectivamente.

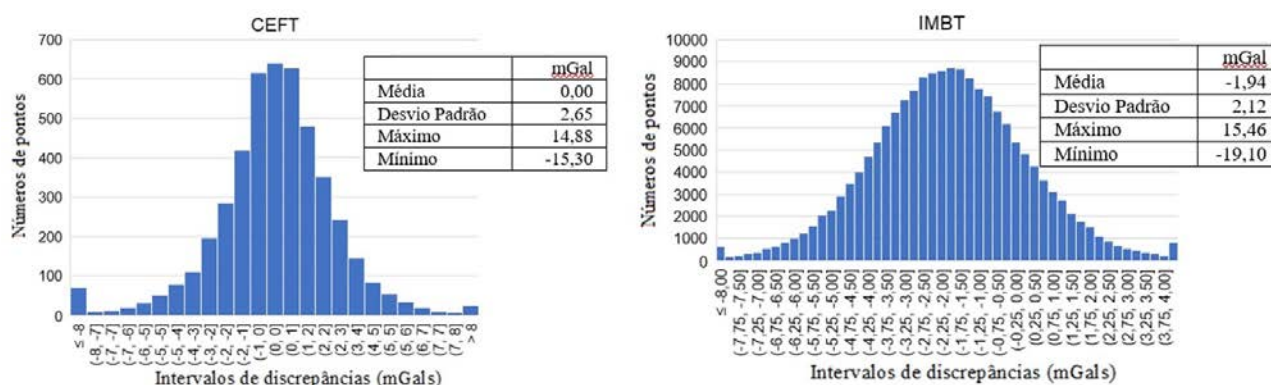


Figura 12. Histograma de distribuição das discrepâncias entre os dados da ANP e o modelo GRAV31.1 pelo método de análise ajuste em área e interpolação LSC.

A Figura 12 evidencia uma distribuição normal em torno da média para a estação CEFT e IMBT. Dentre as fontes de dados analisados, os fornecidos pela ANP apresentaram menor amplitude de discrepância com os modelos estudados. Uma ressalva importante é que, em todas as fontes de dados, os valores da média das discrepâncias para a estação CEFT se aproximaram mais da nulidade do que para a estação IMBT, indiciando erro sistemático nos dados ao redor de IMBT e maior consistência nos valores para CEFT.

Diante dos resultados obtidos destaca-se a necessidade do tratamento dos dados de gravidade marinha antes do seu uso, assim como foi evidenciado por Lequentrec-Lalancette et al. (2016) e Barzaghi et al. (2018), em virtude da detecção de valores que se destoam da realidade estatística e dados cujos quais não apresentaram resultados satisfatórios para a região estudada.

Salienta-se aqui a importância dessa análise

gravimétrica na região oceânica com dados de novos modelos globais do campo de gravidade marinha que apresentaram alta resolução, conforme foi destacado por Leite et al. (1999). No trabalho desses autores, foram detectados ruídos nos modelos que continham apenas dados de altimetria por satélite (SANDWELL; YALE, 1994 e ANDERSEN; KNUDSEN, 1996), devido à resolução dos mesmos. Neste trabalho, esses ruídos não foram encontrados, o que pode ser explicados à incorporação de novos dados e à alta resolução dos modelos GRAV31.1 e DTU17.

Outro notório estímulo ao tratamento e modelagem da região gravimétrica marinha é a demanda de alta precisão de dados gravimétricos para o cálculo do potencial da gravidade visando a realização do IHRS, que de acordo com Sánchez (2020) o objetivo atual é de $1.10^{-1} \text{ m}^2.\text{s}^{-2}$. Assim, uma modelagem precisa que englobe dados de alta e baixa frequência na região costeira é de grande valia.

CONCLUSÕES

Por meio de diferentes fontes de dados de gravimetria marinha, modelos globais de gravidade, métodos de interpolação e abordagens de análises dos dados, foi possível identificar quais as melhores opções para tratamento de dados nas regiões analisadas.

O método de ajuste em área apresentou resultados mais consistentes em todos os cenários analisados, sendo esse, portanto, o mais indicado. Isso pode ser justificado devido ao fato que as trilhas seguidas pelos navios são dispostas em diferentes direções e, como o ajuste em área corrige a deriva em relação à latitude e a longitude do ponto, é cabível sugerir que a tendência no oceano ocasionada pela variação das anomalias de gravidade em função da posição geográfica é minimizada por esse método. O método de análise

por desvio padrão não apresentou boa performance.

O modelo global GRAV31.1 apresentou maior consistência com os dados do BGI e da ANP, com uma menor dispersão entre eles, em todos os métodos de análise e interpolação, por sua vez, o modelo DTU17 apresentou maior consistência aos dados fornecidos pela Marinha do Brasil.

Entre os métodos de interpolação é cabível afirmar que houve maior consistência no método *Kriging*. Apesar do método LSC ter apresentado menores dispersões com os dados da ANP, o método *Kriging* se sobressaiu analisando os dados do BGI que apresentaram alta discrepância com o método LSC.

Entre as fontes de dados de gravidade marinha analisadas, notou-se consistência nos dados do

BGI e da ANP, que apresentaram um bom ajuste aos modelos globais analisados, com uma pequena amplitude de discrepância. Por sua vez os dados da Marinha do Brasil, apresentaram maior amplitude nas discrepâncias de anomalias de gravidade com os modelos globais mesmo

após os ajustes pelos diferentes métodos, não se mostrando adequados para a área de estudo. Isso pode ser devido ao método e objetivo de obtenção dos dados provenientes da Marinha do Brasil que, na época de seu levantamento, não apresentava viés geodésico.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimentos também ao Bureau Gravimétrique International (BGI) / IAG International Gravity Field Service, ao Centro de Hidrografia da Marinha e a Agência Nacional Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis pelos dados de gravidade marinha fornecidos e ao LTG/EPUSP pelos dados de gravimetria terrestre. GSM agradece à FAPDF (00193.00001526/2021-93) pelo suporte financeiro e ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa (PQ-2, 308270/2022-3) e GNG agradece pelo projeto de pesquisa edital Demanda Universal Edital (Processo: 406083/2021-5).

REFERÊNCIAS

- ANDERSEN, O. B.; KNUDSEN, P. Altimetric gravity field from the full ERS-1 geodetic mission. **Physics and Chemistry of the Earth**. Julho de 1996. [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(97)00058-X).
- ANDERSEN, O.B.; KNUDSEN, P. The DTU17 Global Marine Gravity Field: First Validation Results. **Fiducial Reference Measurements for Altimetry**. Springer. 2020. https://doi.org/10.1007/1345_2019_65. ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP Nº847**. 5 de julho de 2021.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; COLLILIEUX, X.; METIVIER, L.; CHANARD, K. ITRF2020: main results and key performance indicators, **EGU General Assembly 2022**, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-3958, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3958>.
- BARZAGHI, R.; CARRION, D.; VERGOS, G.S.; TZIAVOS, I.N.; GRIGORIADIS, V.N.; NATSIOPOULOS, D.A.; BRUINSMA, S.; REINQUIN, F.; SEOANE, L.; BONVALOT, S.; LEQUENTREC-LALANCETTE, M.F.; SALAÛN, C.; ANDERSEN, O.; KNUDSEN, P.; ABULAITIJIANG, A.; RIO, M.H. GEOMED2: High-Resolution Geoid of the Mediterranean. **International Association of Geodesy Symposia**. 2018. https://doi.org/10.1007/1345_2018_33
- BGI - BUREAU GRAVIMÉTRIQUE INTERNATIONALE. **Data /Products**. Disponível em: <https://bgi.obs-mip.fr/data-products/gravity-databases/marine-gravity-datas/>. Acessado em: 21mar2020.
- DENKER, H.; ROLAND, R. Compilation and evaluation of a consistent marine gravity data set surrounding Europe. **Poster IUGG**, Sapporo. 2003.
- DREWES, H.; KUGLITSCH, F.; ADÁM, J.; RÓZSA, S. The Geodesist's Handbook 2016. **Journal of Geodesy**, v. 90, n. 10, p. 907–1205, 2016. DOI: 10.1007/s00190-016-0948-z.
- DTU - DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET (2021) **DTU Space**. Disponível em: <https://ftp.space.dtu.dk/pub/>. Acessado em: 15ago2021.
- Forsberg R, Tscherning CC (2008) An overview manual for the GRAVSOFT geodetic gravity field modelling programs. 2nd edition, Denmark
- GGOS – GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM. **Global Geodetic Observing System**. Disponível em: <https://ggos.org/about/what-is-ggos/>. Acessado em: 11nov2021.
- HEISKANEN, W.A.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. W. H. Freeman and Company, San Francisco and London. 1967.
- HILDENBRAND, J.D. Aerogeofísica no Brasil e a evolução das tecnologias nos últimos 50 anos. **European Association of Geoscientists & Engineers**. 2002. https://doi.org/10.3997/2214-4609-pdb.216.I_SG_SBGf2004_AR001
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. Springer, New York. 2006.
- HUNEGNAW, A.; HIPKIN, R.G.; EDWARDS, J. A method of error adjustment for marine gravity with application to Mean Dynamic Topography in the northern North Atlantic. **J Geod**. 2008. <https://doi.org/10.1007/s00190-008-0249-2>
- IAG - INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY. Description of the Global Geodetic Reference Frame (GGRF). **IAG Executive Committee**. 2016. Disponível em: http://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/GGRF_description_by_the_IAG_V2.pdf. Acessado em: 12jan2021.
- IHDE, J.; BARZAGHI, R.; MARTI, U.; SÁNCHEZ, L.; SIDERIS, M.; DREWES, H.; FÖRSTE, C.; GRUBER, T.; LIEBSCH, G.; PAIL, R. Report of the Ad-hoc Group on an International Height Reference System (IHR). **International Union of Geodesy and Geophysics**. 2015. Disponível em: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1300913/1300913.pdf>. Acessado em: 16nov2020.
- IHDE, J., SÁNCHEZ, L. A unified global height reference system as a basis for. **Journal of Geodynamics**. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2005.06.015>.
- LEITE, E. P.; MOLINA, E. C.; USSAMI, N. Integração de dados de gravimetria marinha e de altimetria por satélite (geosat/erm) no Atlântico Sul (65/25°W e 25/40°S). **Brazilian Journal of Geophysics**, Vol. 17(2,3), 1999.
- LEQUENTREC-LALANCETTE, M.F.; SALAÛN, C.; BONVALOT, S.; ROUXEL, D.; BRUINSMA, S. Exploitation of marine gravity measurements of the mediterranean in the validation of global gravity field models. **International Association of Geodesy Symposia**. 2016. https://doi.org/10.1007/1345_2016_258.
- MARINHA DO BRASIL. **Plano de levantamento da plataforma continental brasileira**. 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/leplac>. Acessado em: 15out2020.
- MAROTTA, G.S.; VIDOTTI, R.M. Development of a local geoid model at the Federal District, Brazil, patch by The Remove-Compute-Restore technique, following Helmert's condensation method. **Bull. Geod. Sci**. 2017. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702017000300035>
- MOHRIAK, W.U.; TORRES, L.C. Levantamentos geofísicos para a delimitação da margem continental brasileira. p. 59-80. **Revista USP**, 2017. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i113p59-80>.
- MONTECINO, H. D. C.; CUEVAS, A. C.; DE FREITAS, S. R. C. A study of the chilean vertical network through global

- geopotential models and the CNES CLS 2011 global mean sea surface. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 2, p. 300 - 316, jun. 2014. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000200018>.
- MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **Journal of Geodesy**, 128–133. 2000. <https://doi.org/10.1007/s001900050278>
- PERSSON, A. The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics, Part I: A history to 1885. **Proceedings...**Norrköping 1-24. 2005.
- POPE, A.J. The Statistics of Residuals and The Detection of Outliers. Geodetic Research and Development Laboratory. 1976. Disponível em: https://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/TRNOS65NGS1.pdf. Acessado em: 15ago2020.
- SANDWELL, D.T.; HARPER, H.; TOZER, B.; SMITH, W.H.F. Gravity field recovery from geodetic altimeter missions. **Adv. Space Res.** 2021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.09.011>.
- SANDWELL, D. T.; YALE, M. M. ERS-1 Geodetic Mission Reveals Detailed Tectonic Structures. **AGU Fall Meeting**, San Francisco, Abstracts, pp. 155. 1994.
- SÁNCHEZ, L.; ÅGREN, 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 (IHR). **Journal of Geodesy**. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01481-0>
- SÁNCHEZ, L.; IHDE, J.; PAIL, R.; GRUBER, T.; BARZAGHI, R.; MARTI, U.; ÅGREN, J.; SIDERIS, M.; NOVÁK, P. Towards a first realization of the International Height Reference System (IHR). **European Geosciences Union General Assembly**. 2017. Bibcode:2017EGUGA..1917104S.
- SÁNCHEZ, L. Sistema Internacional de Alturas IHR (International Height Reference System). **Webinar SIRGAS**. 2020. Disponível em: http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Webinar_20200625_Sanchez_IHR.pdf. Acessado em: 25ago2021.
- SANSÓ, F.; SIDERIS, M.G.S. Geoid Determination – Theory and Methods. **Lecture Notes in Earth System Sciences**. 2013. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74700-0>.
- SANTANA, T. A.; RIBEIRO, L. C.; GUIMARÃES, G. N. Comparação da Altura Geoidal do MAPGEO2015 e GNSS/Nivelamento com a Ondulação Geoidal Derivada da Missão GOCE. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA, 2017, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBC, 115-119, 2017.
- TORGE, W. **Gravimetry**. Ed. Berlin; New York: Walter de Gruyter. 465p. 1989.
- TÓTH, G. IAG Newsletter. **J Geod**, 113–116. 2017. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0994-6>
- UCDS. **Exploring Ocean Tectonics from Space**. Disponível em: https://topex.ucsd.edu/pub/global_grav_1min/. Acessado em: 12ago2021.
- UN-GGIM - UNITED NATIONS INITIATIVE ON GLOBAL GEOSPATIAL INFORMATION MANAGEMENT. The Global Geodetic Reference Frame for Sustainable Development. 2015. Disponível em: <http://www.Unggrf.org>. Acessado em: 16nov2020.
- VANÍČEK, P.; KINGDON, R. Gravimetry. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09145-4>.
- WANG, Y.M.; SÁNCHEZ, L.; ÅGREN, J.; HUANG, J.; FORSBERG, R.; ABD-ELMOTAAL, H.A.; AHLGREN, K.; BARZAGHI, R.; BAŠIĆ, T.; CARRION, D.; CLAESSENS, S.; EROL, B.; EROL, S.; FILMER, M.; GRIGORIADIS, V.N.; ISIK, M.S.; JIANG, T.; KOÇ, Ö.; KRČMARIC, J.; LI, X.; LIU, Q.; MATSUO, K.; NATSIPOULOS, D.A.; NOVÁK, P.; PAIL, R.; PITOŇÁK, M.; SCHMIDT, M.; VARGA, M.; VERGOS, G.S.; VÉRONNEAU, M.; WILLBERG, M.; ZINGERLE, P. Colorado geoid computation experiment: overview and summary. **Journal of Geodesy**, v. 95, n. 12, p. 127, 2021. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01567-9>.
- WESSEL, P.; WATTS, A.B. On the Accuracy of Marine Gravity Measurements. **Journal of Geophysical Research**. 1998. <https://doi.org/10.1029/JB093iB01p00393>.
- WZIONTEK, H.; BONVALOT, S.; FALK, R.; GABALDA, G.; MÄKINEN, J.; PÁLINKÁŠ, V.; RÜLKE, A.; VITUSHKIN, L. Status of the International Gravity Reference System and Frame. **Journal of Geodesy**. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01438-9>.

*Submetido em 8 de agosto de 2022
Aceito para publicação em 15 de março de 2023*