

Avaliação de modelos globais do geopotencial em zonas costeiras do Brasil

RESUMO

Tulio Alves Santana

tulio.santana@ifmt.edu.br

orcid.org/0000-0002-4429-9409

Instituto Federal de Mato Grosso, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Jayne Gambarine Soares

jaynegambarine@ufu.br

orcid.org/0000-0002-3831-4924

Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Samuel Giehl

samoelgiehl@gmail.com

orcid.org/0000-0002-4971-4253

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Regiane Dalazoana

regiane@ufpr.br

orcid.org/0000-0001-5468-0679

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Estudos em zonas costeiras vão ao encontro dos propósitos da Geodésia que tem como principal objetivo contribuir no monitoramento das variações do Sistema Terra e das perspectivas futuras deste campo, através da concepção do Sistema Geodésico Global de Observação (*Global Geodetic Observing System - GGOS*) e do estabelecimento da Rede de Referência Altimétrica Internacional (*International Height Reference Frame - IHRF*). Este estudo visa avaliar Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) em zonas costeiras do Brasil com o objetivo central de investigar o comportamento desses modelos nestas regiões e colaborar com as discussões acerca da unificação dos referenciais verticais oceânico e terrestre, além do estabelecimento do IHRF. Após a delimitação da área de estudo, com base na comparação de modelos globais e observações locais do funcional anomalia de altitude em 550 estações geodésicas, foi possível encontrar resultados que indicam os MGGs que melhor se adequam nas zonas costeiras brasileiras. A avaliação foi realizada a partir de dados GNSS (GPS) e Nivelamento utilizando o método absoluto para a análise. Foram selecionados 13 (treze) modelos, sendo que todos foram analisados em quatro categorias, em função da resolução espectral, sendo elas: a de modelos com grau de desenvolvimento máximo; a segunda com grau de desenvolvimento elevado (1420 a 2190); a terceira com grau de desenvolvimento médio (até 720); e a quarta com o grau de desenvolvimento mais baixo (até 360). Os modelos que apresentaram os melhores resultados foram o XGM2019e_2159 nas três primeiras categorias de análise e o GGM05C na quarta categoria com modelos com desenvolvimento até o grau 360.

PALAVRAS-CHAVE: Unificação dos referenciais verticais oceânicos e terrestre. Sistemas de altitudes. *International Height Reference Frame*.

INTRODUÇÃO

Na Geodésia, a modelagem do campo de gravidade terrestre permite descrever a superfície topográfica continental e oceânica, visto que as observações geodésicas, em grande parte são regidas por este campo, desde as observações de altimetria por satélite até as que materializam a vertical do local. Além disso, é através do conhecimento do comportamento do campo de gravidade terrestre que se modela a superfície geoidal, tido como o referencial para os sistemas de altitudes ortométricas (TORGE, 2012; BIDEI et al., 2018).

A modelagem do campo de gravidade pode ser realizada por levantamentos *in situ* com gravímetros supercondutores, relativos e/ou absolutos ou com sensores embarcados em satélites, aeronaves, navios e barcos (PLAG et al., 2009). Nessa esfera, destacam-se principalmente as contribuições das missões satelitais *Challenging Mini-satellite Payload* (CHAMP), *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e *Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer* (GOCE) que são fundamentais para o estabelecimento do monitoramento do sistema Terra. Estas missões passadas juntamente com a GRACE-FO (Follow-On) contribuem com informações do campo de gravidade com acurácia e resoluções temporal e espacial para fins geodésicos (FLECHTNER; SCHUH; SNEEUW, 2014).

Vale ressaltar, que os primeiros estudos referentes à modelagem do campo de gravidade terrestre foram realizados por pesquisadores como: Clairaut, de Sitter, Helmert, Pizzetti, Somigliana, Lambert, entre outros (RAPP, 1998). Esses estudos foram importantes para a consolidação do modelo “Terra normal” dado pelo Elipsoide de revolução que é aceito na atualidade como a melhor aproximação geométrica do planeta. Tal afirmação é válida principalmente porque esse modelo apresenta as mesmas características da Terra, como mesma massa e módulo de velocidade de rotação. Ao longo dos anos, as missões para modelagem do campo da gravidade, a maior disponibilidade de observações geodésicas terrestres e o desenvolvimento da computação possibilitaram o cálculo de mais de uma centena de modelos globais do campo de gravidade, ditos Modelos Globais do Geopotencial (MGGs) (INCE et al., 2019).

Um Modelo Global do Geopotencial (MGG) é uma aproximação matemática ao potencial gravitacional externo de um corpo atraente, e nesse caso, a Terra é o corpo que provoca a atração. Este modelo constitui-se de um conjunto de parâmetros terrestres e coeficientes do potencial anômalo dado em harmônicos esféricos com incertezas associadas. Na concepção de um MGG são calculadas quantidades derivadas do potencial gravitacional, conhecidas também como funcionais do campo de gravidade (SANSÓ; SIDERIS, 2013). São funcionais: os distúrbios de gravidade, as anomalias de gravidade, as anomalias de altitude, as altitudes ou ondulações geoidais, os valores de gravidade sobre a superfície terrestre e sobre o Elipsoide, entre outras (BARTHELMES; INCE; REIBLAND, 2017).

Os MGGs expressam o geopotencial discretizado e expandido em termos de harmônicos esféricos (Equação 1) (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006). Na equação, C_{nm} e S_{nm} caracterizam a singularidade do desenvolvimento dos modelos e são denominados coeficientes de Stokes. A singularidade é vista porque definido o Elipsoide de Referência e o ponto de cálculo, esses coeficientes são únicos para cada MGG (NICACIO; DALAZOANA, 2018). Os demais termos correspondem a: r é a distância do ponto de cálculo ao geocentro do modelo adotado, φ a latitude geodésica, λ a longitude geodésica, GM é a constante

gravitacional geocêntrica, a é o semieixo maior do Elipsoide de revolução associado ao modelo, ω o módulo da velocidade angular terrestre e P_{nm} representam as funções de Legendre relacionadas ao grau n e ordem m .

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\sin \varphi) \right] + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\sin \varphi)] \quad (1)$$

Diversos autores realizaram pesquisas a fim de avaliar o comportamento dos MGGs em regiões brasileiras ou no país como um todo. Citam-se alguns desses estudos: Santos, Cerqueira e Jamur (2010) analisaram os modelos EGM2008 e MAPGEO2004 no município de Maceió-AL com 116 estações geodésicas; Calado e Garnés (2017) avaliaram a acurácia do EGM2008 e MAPGEO2015 para o município de Recife-PE por meio de 7 estações geodésicas; Guimarães, Matos e Blitzkow (2012) avaliaram os modelos mais recentes (à época da pesquisa) derivados da missão GOCE, foram utilizadas 176 estações geodésicas localizadas no Estado de São Paulo; Melo e De Freitas (2012) estudaram a adequação de modelos somente satélites, GRACE e GOCE, e os combinados, EIGEN-05C e EGM2008, para os Estados do Maranhão e Piauí a partir de 47 estações geodésicas. Todas essas pesquisas foram baseadas na avaliação relativa ou absoluta de estações geodésicas que possuíam altitudes referidas ao Elipsoide e (quase) geóide simultaneamente, ou seja, avaliação GNSS(GPS)/Nivelamento.

Especificamente, ainda não há pesquisas direcionadas à avaliação de MGGs em zonas costeiras no Brasil. Nestas zonas vivem 10% da população mundial e 13% da população urbana mundial (MCGRANAHAN; BALK; ANDERSON, 2007), essas áreas carecem de infraestrutura geodésica consistente para a realização de estudos e monitoramento de variações ao longo do tempo, principalmente, para observação da tendência de elevação do nível do mar constatada em IPCC (2021). Levantamentos, inventários e integração de observações geodésicas, tanto da parte terrestre quanto da parte oceânica, funcionam como ferramenta para a realização destes estudos.

Os objetivos desta pesquisa são amplos no âmbito do cumprimento dos almejos da Geodésia moderna. Assim sendo, busca-se avaliar as observações globais de MGGs com relação às observações locais que compõem o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), a partir de análises de funcionais do campo de gravidade, especificamente anomalias de altitude. Ao cabo da pesquisa, espera-se responder sobre a adequação dos MGGs em zonas costeiras no Brasil, sobretudo, a fim de contribuir com os esforços inerentes a implementação do Sistema de Referência Altimétrica Internacional (*International Height Reference System - IHR*) (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017) e também na busca por alternativas para a integração dos componentes verticais em zona costeira (SANTANA, 2020; SANTANA; DALAZOANA, 2020).

JUSTIFICATIVA

Estudos em zonas costeiras e com os objetivos de contribuir com a investigação do comportamento de modelos e observações geodésicas, além do monitoramento das variações temporais nestas zonas vão de encontro aos objetivos da Geodésia e com as temáticas do GGOS. Estas, atualmente,

concentram-se em três áreas de atuação: Unificação dos Sistemas de Altitudes; Monitoramento de riscos geológicos; e Pesquisa geodésica sobre o clima espacial (GGOS, 2021).

Quanto à área de “Unificação dos sistemas de altitudes”, muito se tem discutido sobre os esforços internacionais para a definição do IHRS e sua materialização IHRF (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017). Dentre o conjunto de desafios, um deles é a implantação de estações IHRF em regiões de integração oceano/continente, sendo recomendado, para solução do Problema de Valor de Contorno da Geodésia (PVCG), o uso de dados de gravidade bem distribuídos num raio de 210km no entorno do ponto de interesse (SANCHÉZ et al., 2016). Além dos dados de gravidade, dentro do contexto da decomposição espectral com a técnica de Remover-Restaurar, os MGGs são insumos para a componente altimétrica das estações IHRF. Assim a proposta de avaliar os modelos em zonas costeiras proporciona indicativos da adequação destes modelos nessas regiões e respostas acerca de qual(is) MGG(s) é (são) de uso mais indicado.

MATERIAL E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A região de estudo dessa pesquisa é a zona costeira do Brasil, a qual foi delimitada até uma distância de 210 km a partir da linha de costa. Isso em função do valor do raio de cálculo mencionado para as estações IHRF. Nessa região se encontram 550 estações do SGB as quais possuem conexão entre os dados de levantamento GNSS (com altitude elipsoidal) e nivelamento (com altitude normal), ou seja, as estações fazem parte das duas redes do SGB, Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP e Rede Planialtimétrica. A Figura 1 apresenta as estações que compõem o estudo.

Figura 1 - Localização da área de estudo: Zona costeira do Brasil



Fonte: Autoria própria (2021).

Com base nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as 550 estações da área de estudo foram visitadas entre os anos de 1995 e 2020. Essas visitas consistem em uma inspeção do marco geodésico cuja situação e data da visita constam do relatório da estação geodésica. Com relação à data da visita, notou-se que entre os anos de 2016 a 2018 foram visitadas mais de 41% das estações sob estudo, mais de 70 estações em cada um desses anos (Figura 2).

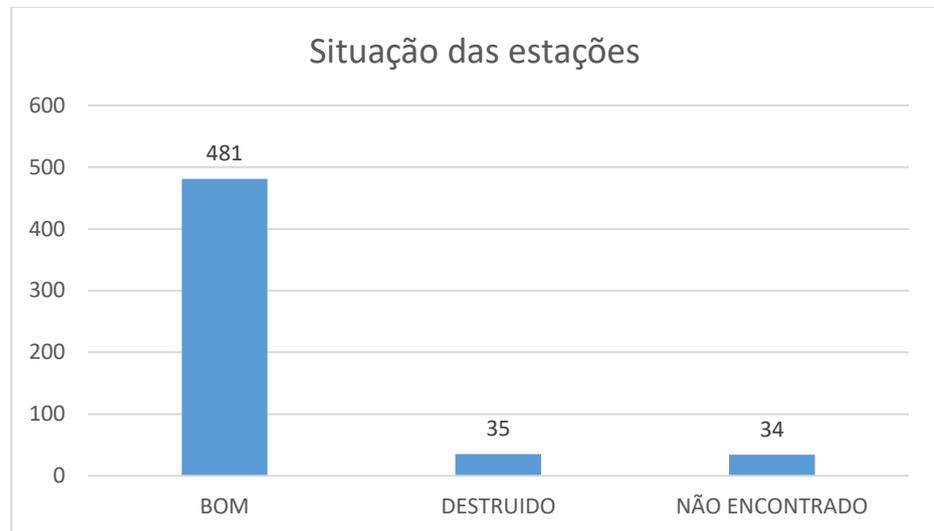
Figura 2 - Ano da visita das 550 estações



Fonte: Autoria própria (2021).

Outra informação dada nesta inspeção diz respeito à situação da estação, que consiste em: boa, destruída e não encontrada. Ao observar a Figura 3 pode ser notado que em sua maioria, ou seja, 481 estações encontram-se em bom estado de conservação, 35 destruídas e 34 não encontradas.

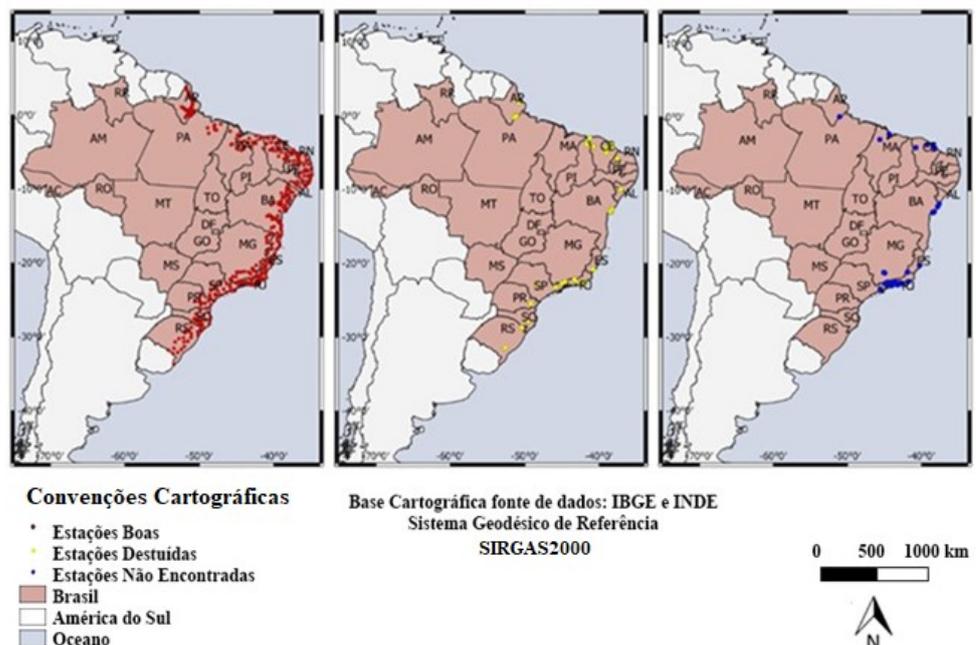
Figura 3 - Situação das estações



Fonte: Autoria própria (2021).

Já a Figura 4 apresenta uma representação cartográfica da distribuição espacial das estações conforme a realidade física. Pode-se perceber que em toda a zona costeira o único local onde há um pequeno vazio de estações é no estado do Pará, devido à foz do Rio Amazonas. Já as estações destruídas estão espalhadas por toda a zona costeira do Brasil. Nas regiões Sudeste, Nordeste e Norte estão todas as estações não encontradas, com destaque para o estado do Rio de Janeiro.

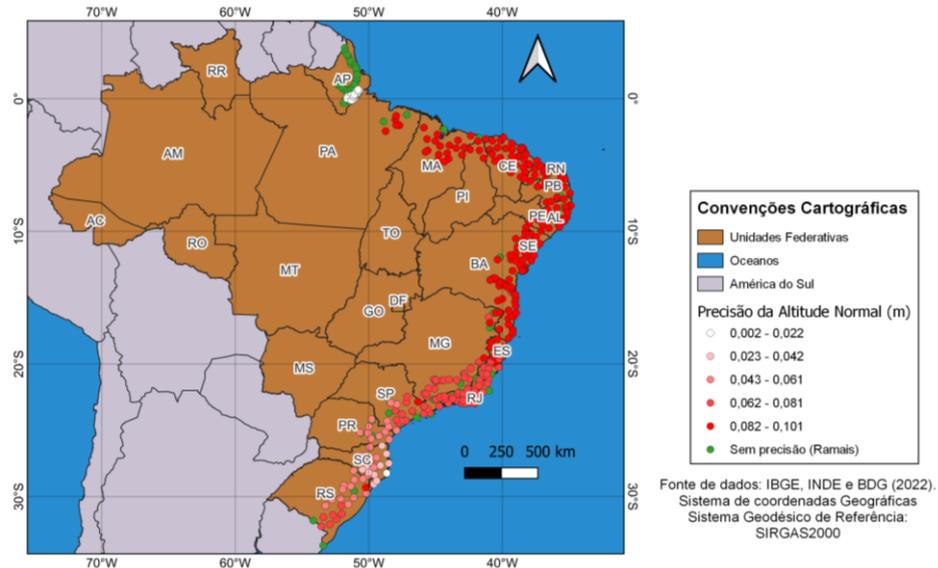
Figura 4 - Distribuição espacial e situação das estações



Fonte: Autoria própria (2021).

Além da realidade física das estações geodésicas, também foi objeto de investigação a precisão das altitudes normais das 550 estações geodésicas que fizeram parte do estudo. Como pode ser observado na Figura 5 a precisão apresenta amplitude de 2 mm a 10,1 cm ao longo da costa, é visto que ao se afastar do *Datum* vertical de Imbituba a precisão se deteriora.

Figura 5 - Distribuição espacial da precisão da altitude normal



Fonte: Autoria própria (2021).

MATERIAL

Os dados de altitude normal e elipsoidal das estações foram obtidos junto ao IBGE no formato de arquivos vetoriais (*shapefile*) considerando a distância de 210 km a partir da linha de costa, 550 estações geodésicas apresentam as informações de altitude citadas. A espacialização dos dados foi feita com o programa QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2022).

Os MGGs foram escolhidos tendo por base as informações disponibilizadas pelo *International Center for Global Gravity Field Models* (ICGEM), referentes aos resultados das avaliações GNSS(GPS)/Nivelamento em todo o território brasileiro. Na Tabela 1 são apresentadas as informações de cada MGG selecionado, as quais são: a resolução espectral ou o grau máximo de desenvolvimento, as fontes de dados utilizadas na geração do modelo e os valores de *Root Mean Square Error* (RMSE) obtidos na avaliação global e no país. Foram selecionados os MGGs com grau de desenvolvimento maior que 300 e RMSE menor que 50 cm. Destes modelos, 13 (treze) atendem a esses critérios no território brasileiro. Destes, 8 (oito) possuem o grau máximo acima de 1420, 10 (dez) o grau máximo acima de 720 e 3 (três) com grau de desenvolvimento até 359.

Tabela 1 - MGGs com os melhores resultados para o Brasil na avaliação GNSS/Nivelamento

Nr.	Modelo	Fonte	Grau máximo	RMSE Brasil (m)	RMSE Global (m)
176	XGM2019e_2159	A, G, S (GOCO06s), T	2190	0,438	0,236
161	XGM2016	A, G, S (GOCO05s)	720	0,440	0,249
131	EIGEN-6C2	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1949	0,445	0,237
154	GOCO05c	A,G,S	720	0,445	0,254
167	SGG-UGM-1	EGM2008, S (Goce)	2159	0,446	0,235
148	EIGEN-6C4	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	2190	0,446	0,236
139	EIGEN-6C3stat	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1949	0,447	0,237
125	EIGEN-6C	A, G, S (Goce, Grace, Lageos)	1420	0,448	0,238
152	GECO	EGM2008, S (Goce)	2190	0,451	0,237
104	EGM2008	A, G, S(Grace)	2190	0,460	0,240
153	GGM05C	A, G, S (Goce, Grace)	360	0,461	0,305
126	GIF48	A, G, S(Grace)	360	0,474	0,306
114	EIGEN-51C	A, G, S (Champ, Grace)	359	0,476	0,322

Fonte: ICGEM (2019).

Quanto à fonte de dados utilizada no cálculo dos MGGs, eles são associados às letras: S - quando foram calculados com dados de satélites, A - quando foram utilizados dados de altimetria, T - quando foi inserido a topografia e G - para observações de gravidade sobre a superfície terrestre (a partir de levantamentos terrestres ou com equipamentos embarcados em aeronaves ou navios) (ICGEM, 2019). Quanto ao conjunto de dados utilizados para o cálculo dos modelos, eles podem ser classificados em: modelos somente satélites (*satellite-only*), modelos combinados (*combined*) e modelos adaptados (*tailored*) (AMOS; FEATHERSTONE, 2003, FEATHERSTONE, 2002):

- a) Modelos somente satélites: modelos com fonte de dados somente de satélites, tais como, GRACE, GOCE, CHAMP e LAGEOS. Alcançam graus de desenvolvimento mais baixos. São exemplos destes modelos e seus respectivos graus máximos de desenvolvimento: GO_CONS_GCF_2_DIR_R6 (300) (BRUINSMA et al., 2014), GOCO06s (300) (KVAS et al., 2019) e ITSG-Grace2018s (200) (MAYER-GÜRR et al., 2018);
- b) Modelos combinados: modelos derivados da combinação de distintas fontes de dados, tais como, modelos somente satélites, gravimetria terrestre, dados de gravimetria marinha derivada de satélites altímetros e gravimetria aérea. São exemplos destes modelos e seus respectivos graus máximos de desenvolvimento: SGG-UGM-1 (2159) (LIANG et al., 2018), XGM2016 (719) (PAIL et al., 2017) e GECO (2190) (GILARDONI; REGUZZONI; SAMPIETRO, 2016); e
- c) Modelos adaptados: modelos derivados de refinamentos regionais de modelos já existentes, podendo ser de modelos combinados ou somente satélite, utilizando necessariamente dados de gravidade com alta resolução. É exemplo de modelo adaptado: MAPGEO2015 que é um modelo derivado do modelo EIGEN-6C4 até grau e ordem 200 (BLITZKOW et al., 2016). Observação: Se faz necessário ressaltar, que o MAPGEO2015 é apenas um modelo geoidal, dele não é possível o cálculo das demais funcionais da gravidade como ocorre com os MGGs.

MÉTODOS

O cálculo e a disponibilização de diferentes modelos ao passar dos anos levaram ao interesse em verificar seu comportamento e adequação para regiões específicas ou para o planeta como um todo. As avaliações incluem comparações de valores pontuais de anomalias de gravidade terrestre, observações de estações GNSS(GPS)/nivelamento e valores do desvio da vertical de Helmert (AMOS; FEATHERSTONE, 2003). Dentre esses, o que se popularizou pelo uso foi o GNSS(GPS)/Nivelamento, uma vez que a grande maioria das avaliações são baseadas nesta abordagem.

A avaliação de MGGs por GNSS(GPS)/Nivelamento pode ser feita utilizando dois métodos, o absoluto e relativo (NICACIO; DALAZOANA, 2018). Nessa pesquisa, foi utilizado o método absoluto, o qual é consolidado com a aplicação direta da equação que combina as altitudes, sobre as superfícies do quase-geoide (H^N - Altitude Normal) e do Elipsoide (h - Altitude elipsoidal), tendo a separação dada pela anomalia de altitude (ζ) (GEMAEL, 1999). Para mais detalhes sobre o método relativo pode ser consultado Nicácio e Dalazoana (2018).

Nesse sentido, foram obtidos do Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE os dados das estações escolhidas, que compreendem as informações de latitude, longitude, altitude elipsoidal e altitude normal de cada estação. Através do ICGEM, em seu serviço de cálculo pela internet, foi obtida a anomalia de altitude ($\zeta^{modelada}$), proveniente dos MGGs.

No serviço de cálculo do ICGEM são necessárias algumas definições a priori, tais como, os pontos de cálculo, o modelo de interesse, a função de cálculo, o grau, o sistema geodésico de referência, o sistema de maré e a consideração ou não do termo de ordem zero que se deseja. Assim o ICGEM calcula a anomalia de altitude com essas definições e lista com as coordenadas de interesse.

Para uma análise correta dos dados é necessário que os sistemas de maré sejam compatíveis, por isso optou-se por adotar o sistema de maré médio de acordo com as recomendações internacionais para o estabelecimento do IHRS e o Elipsoide de Referência GRS80 (IAG, 2015). Para tanto foi realizada a conversão da altitude elipsoidal das estações GNSS do sistema livre maré (tide-free) para o sistema mean tide (maré média) a partir da Equação 2, onde h é altitude elipsoidal, Ψ a latitude geocêntrica, k e j são os números de Love (TENZER et al., 2011).

$$h_{mean-tide} = h_{tide-free} - (1 + k - j) \left[-0.198m \left(\frac{3}{2} \text{sen}^2\Psi - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2)$$

A maré permanente (maré de longo período) teve, pela primeira vez, sua importância discutida para observações geodésicas em Jensen (1949) e Honkasalo (1964). Faz-se necessário destacar que as transformações entre sistemas de marés permanentes para altitudes e medidas de gravidade são indicadas para os seguintes casos: comparação entre distintos sistemas de altitudes ou sistemas gravimétricos; cálculo de altitudes a partir de diferentes nivelamentos dentro de um país; estudo do nível médio do mar; comparação de altitudes elipsoidais e altitudes niveladas; e cálculo de altitudes geoidais com a fórmula de Stokes (EKMAN, 1989).

A não compatibilização dos sistemas de marés pode ocasionar análises equivocadas, porque globalmente as diferenças entre os sistemas podem alcançar

20 cm para altitudes definidas em sistemas de maré média e maré zero, 14 cm para aquelas altitudes definidas entre os sistemas de maré média e livre de maré e por fim 6 cm para os sistemas de maré zero e livre de maré (TENZER et al., 2011).

Após a compatibilização no mesmo sistema de maré permanente, foi calculada a anomalia de altitude (ζ) para as estações geodésicas por meio da subtração da altitude elipsoidal (h) pela altitude normal (H), conforme Equação 3.

$$\zeta^{calculada}_p \approx h_p - H^N_p. \quad (3)$$

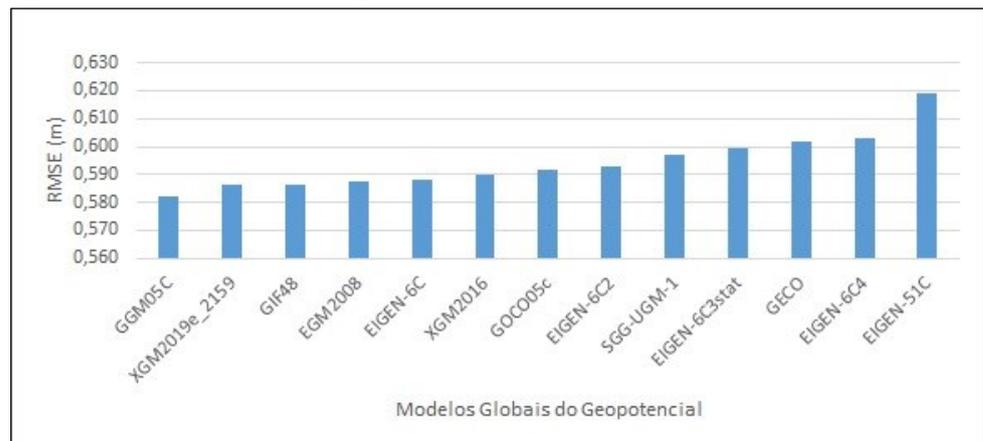
Os valores de anomalia de altitude calculados foram comparados com os valores de anomalia de altitude modelados ($\zeta^{modelada}$) a partir dos 13 (treze) MGGs que compõem a pesquisa com relação aos valores de RMSE e os desvios padrão.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a apresentação e discussão dos resultados dividiu-se os MGGs em quatro categorias: a primeira considerou todos os modelos selecionados com seu respectivo grau de desenvolvimento máximo; a segunda considerou apenas os modelos com grau de desenvolvimento elevado (1420 a 2190); a terceira considerou os modelos com grau de desenvolvimento médio (até 720); e a quarta considerou os modelos com o grau de desenvolvimento mais baixo (até 360).

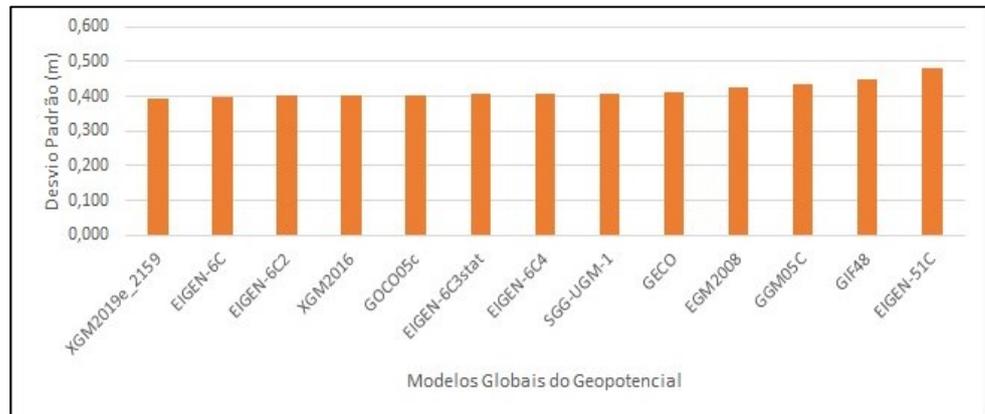
Na análise dos modelos em seus graus máximos de desenvolvimento, o modelo GGM05C (grau 360) apresentou o menor RMSE, com o valor de 0,582 m e desvio padrão de 0,437 m. Já o modelo XGM2019e_2159 (2190), apresentou o valor de RMSE de 0,586 m, ligeiramente maior, porém possui o menor desvio padrão de 0,393 m (Figuras 6 e 7).

Figura 6 - RMSE dos MGGs com grau de desenvolvimento máximo variando de 359 a 2190



Fonte: Autoria própria (2021).

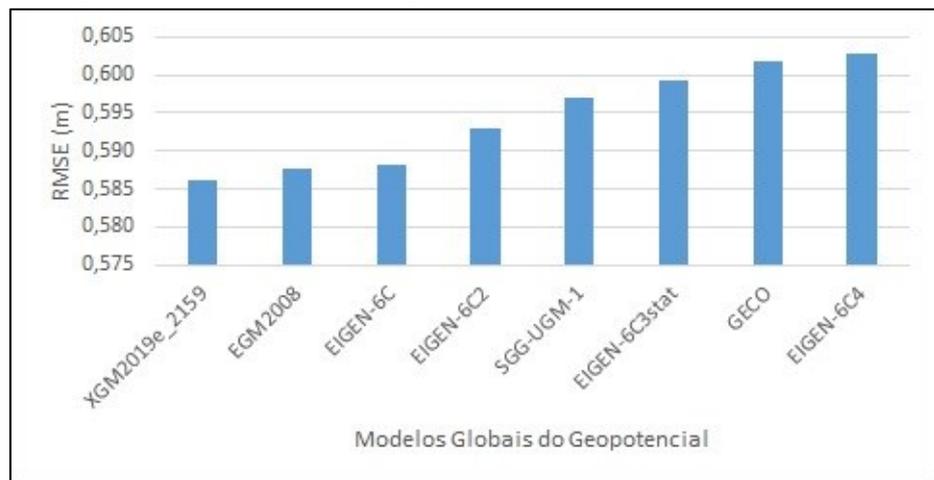
Figura 7 - Desvio Padrão dos MGGs com grau de desenvolvimento entre 359 e 2190



Fonte: Autoria própria (2021).

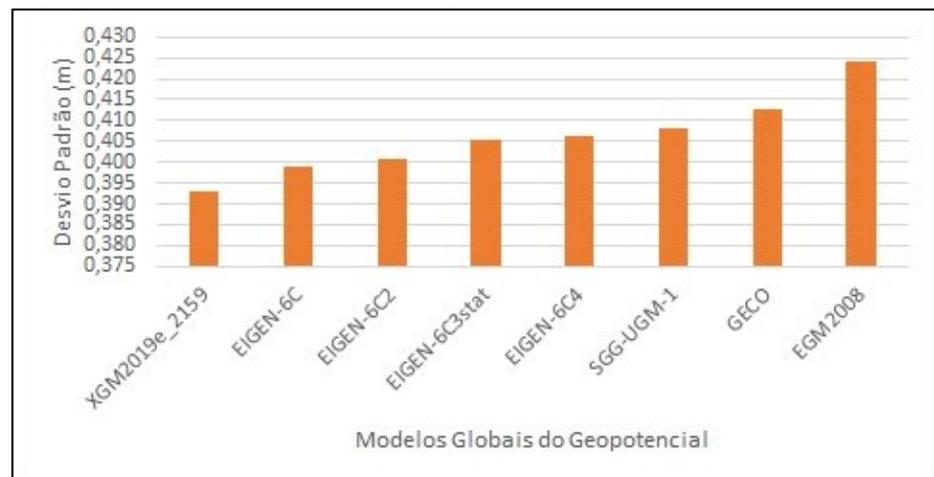
Em uma nova análise, agora com 8 modelos com grau de desenvolvimento elevado (de 1420 a 2190), destaca-se que o modelo XGM2019e_2159 possui o menor RMSE e também o menor desvio padrão (Figuras 8 e 9).

Figura 8 - RMSE dos MGGs com grau de desenvolvimento entre 1420 e 2190



Fonte: Autoria própria (2021).

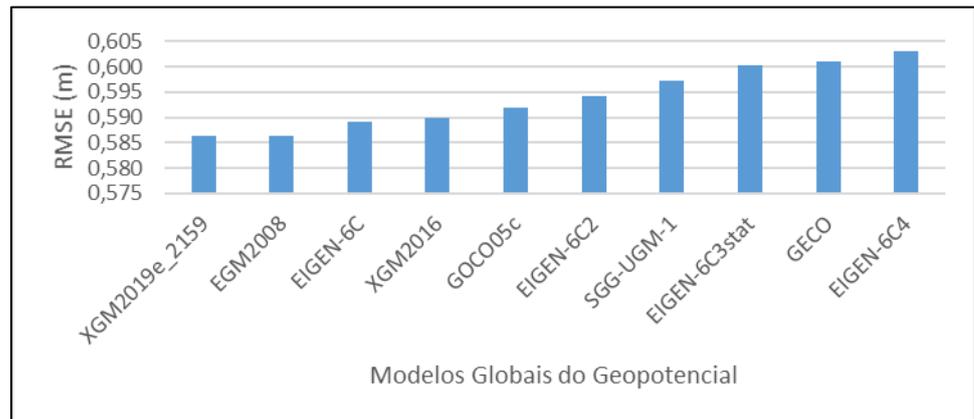
Figura 9 - Desvio Padrão dos MGGs com grau de desenvolvimento entre 1420 e 2190



Fonte: Autoria própria (2021).

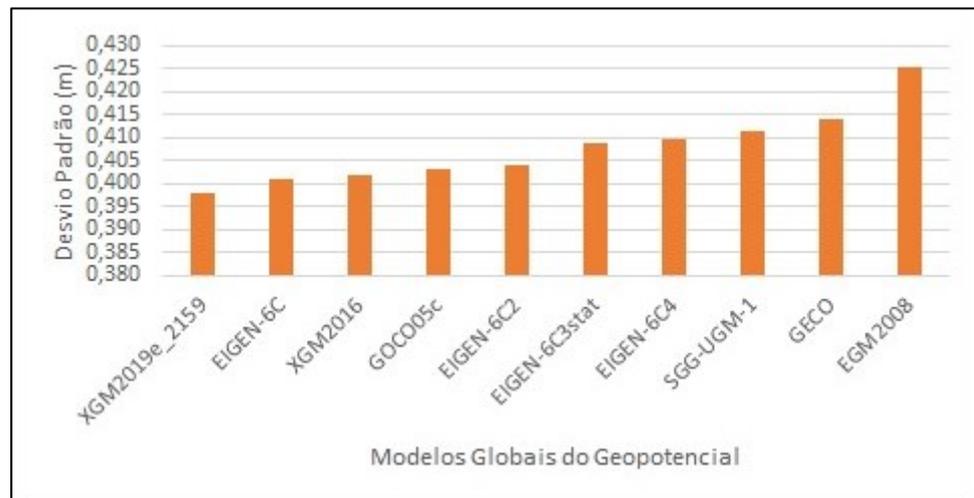
Para analisar o grau de desenvolvimento de até 720, foram tomados 10 MGGs, dois deles obtiveram o mesmo valor de RMSE, que são: XGM2019e_2159 e EGM2008, com o valor de 0,586 m. Porém, foi observado que o valor do desvio padrão do EGM2008 é maior em relação ao XGM2019e_2159. O XGM2019e_2159 apresenta desvio padrão de 0,398 m, já o EGM2008 tem desvio padrão de 0,425 m (Figuras 10 e 11).

Figura 10 - RMSE dos MGGs com grau de desenvolvimento até 720



Fonte: Autoria própria (2021).

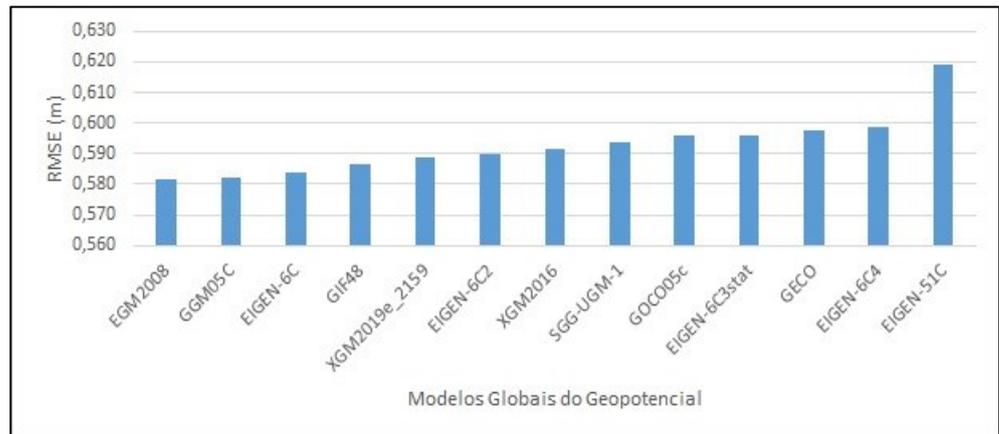
Figura 11 - Desvio Padrão dos MGGs com grau de desenvolvimento até 720



Fonte: Autoria própria (2021).

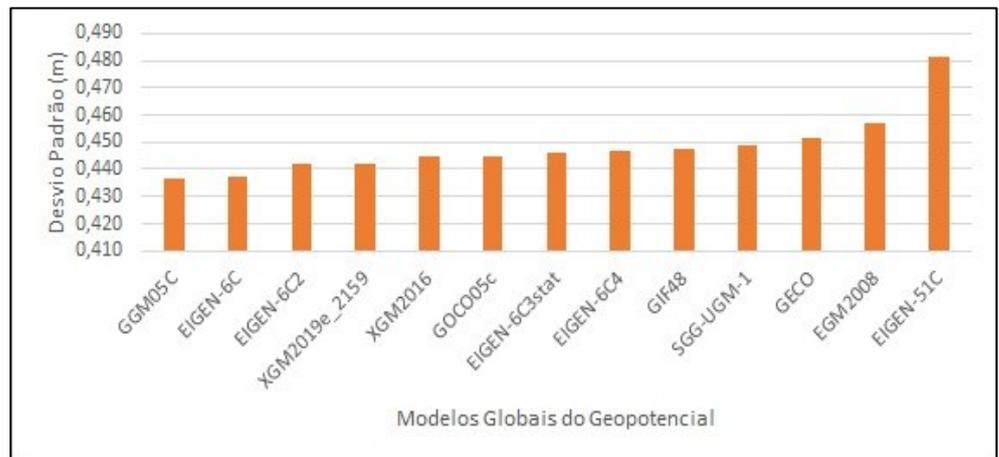
Por fim, se apresenta uma análise baseada no grau de desenvolvimento até 360 para os 13 modelos estudados. Essa análise com baixo grau e ordem é particularmente interessante para o caso das estações do IHRF, aos quais na solução do PVCG poderá ser utilizada a técnica Remover-Restaurar. Conclui-se que dois modelos apresentaram o menor valor de RMSE, o EGM2008 e GGM05C com 0,582 m. Considerando os desvios padrões dos modelos GGM05C e EGM2008 de 0,437 e 0,450 m, respectivamente, constata-se que o modelo mais indicado para estudos com o grau em questão é o GGM05C devido a menor dispersão do erro (Figura 12 e 13).

Figura 12 - RMSE dos MGGs com grau de desenvolvimento até 360



Fonte: Autoria própria (2021).

Figura 13 - Desvio Padrão dos MGGs com grau de desenvolvimento até 360



Fonte: Autoria própria (2021).

Ao se comparar os resultados encontrados na pesquisa com os resultados divulgados pelo ICGEM (Tabela 1) é possível observar uma convergência nos valores numéricos, as diferenças são porque no estudo proposto é realizado um recorte do território brasileiro que é zona costeira e no ICGEM é analisado todo território. Algo a ser pontuado, nessa análise comparativa, é que os resultados do ICGEM apresentam um RMSE de todos os modelos em grau máximo de desenvolvimento, não sendo possível a análise de maneira categorizada como foi proposto na pesquisa.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados encontrados, o modelo que mais se mostrou eficiente na maioria dos cenários analisados foi o XGM2019e_2159, pois possui os menores valores de RMSE e desvios padrão absolutos na grande maioria dos cenários analisados mesmo com grau de desenvolvimento máximo.

A respeito da análise do desvio padrão entre os MGGs com diferentes graus de desenvolvimento, constatou-se que todos os modelos com grau de desenvolvimento até 360 apresentaram o desvio padrão maior em relação aos

outros modelos. Além disso, os valores de desvio padrão para os modelos com grau de desenvolvimento entre 1420 e 2190 apresentaram uma pequena melhoria em relação aos modelos com grau de desenvolvimento até 720.

No entanto, é importante destacar o potencial do modelo GGM05C no cenário em que todos os modelos foram analisados em seu grau máximo, ele apresentou menor RMSE e quando analisados todos os modelos com desenvolvimento até 360 apresentou menor desvio padrão e RMSE.

Por fim, aponta-se para a necessidade que também seja realizada em continuidade a esta pesquisa a avaliação GNSS/Nivelamento dos MGGs pelo método relativo para as estações geodésicas em zonas costeiras. Principalmente considerando que de acordo com Nicacio e Dalazoana (2018) o método relativo traz maior acurácia na análise de modelos.

Evaluation of global models of geopotential in coastal zones in Brazil

ABSTRACT

Coastal zone studies are aligned with Geodesy's purposes of contributing to the monitoring of Earth system variations and prospects in this field, through the Global Geodetic Observing System's (GGOS) design and the establishment of the International Height Reference Frame (IHRF). This paper aims to evaluate Global Geopotential Models (GGMs) in Brazil Coastal Zones, collaborating with the discussions about the unification of oceanic and terrestrial vertical references, in addition to the establishment of the IHRF. After the delimitation of the study area and a comparison of global models and local observations of the functional height anomaly in 550 geodetic stations, thirteen GGMs were selected that are best suited in Brazilian coastal zones. The evaluation was carried out from GNSS (GPS) and Leveling data using the absolute method for analysis. These models were analyzed in four categories, namely: models with maximum degree of development; models with a higher degree of development (1420 to 2190); models with a medium level of development (up to 720); and models with the lowest degree of development (up to 360). The models that showed the best results were the XGM2019e_2159 in the first three categories of analysis and the GGM05C in the fourth category with models with development up to degree 360.

KEYWORDS: Unification of oceanic and terrestrial vertical references. Height Systems. International Height Reference Frame (IHRF).

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao programa de Iniciação Científica Voluntária da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). E também o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 pela concessão da bolsa de estudo para o terceiro autor.

REFERÊNCIAS

AMOS, M. J.; FEATHERSTONE, W. E. Comparisons of Recent Global Geopotential Models with Terrestrial Gravity Field Observations Over New Zealand and Australia. **Geomatics Research Australasia**. [S.l.], v. 79, p. 1-20, 2003.

BARTHELMES, F.; INCE, E. S.; REIBLAND, S. International Centre for Global Earth Models (ICEGEM). 2017. Disponível em: < http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM-Report_2015-2017.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2019.

BIDEL, Y.; ZAHZAM, N.; BLANCHARD, C.; BONNIN, A.; CADORET, M.; BRESSON, D.; ROUXEL, D.; LEQUENTREC-LALANCETTE, M. F. Absolute marine gravimetry with matter-wave interferometry. **Nature Communications**, [s.l.], v. 9, n. 1, p.1-9, 12 fev. 2018. <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-03040-2>.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C.; MACHADOM W. C.; NUNES, M. A.; LENGROBER, N. V.; XAVIER, E. M. L.; FORTES, L. P. S. MAPGEO2015: O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 68, n. 10, p.1873-1884. 19 nov. 2016.

BRUINSMA, S.; FÖRSTE, C.; ABRIKOSOV, O.; LEMOINE, J-M.; MARTY, J-C.; MULET, S.; RIO, M-H.; BONVALOT, S. ESA's satellite-only gravity field model via the direct approach based on all GOCE data, **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 41, n. 21, p. 7508-7514, nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1002/2014GL062045>.

CALADO, L. G. L. P.; GARNÉS, S. J. dos A. Avaliação da acurácia do EGM2008 e MAPGEO2015 para a cidade do Recife/PE. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2017, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, p. 444-450, 2017.

EKMAN, M. Impacts of Geodynamic Phenomena on Systems for Height and Gravity. **Bull. Géod.**, v. 63, p. 281–296, 1989.

FEATHERSTONE, W. Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia. **Journal of Geospatial Engineering**. [S.l.], v. 4, n.1, p. 1-18, 2002.

FLECHTNER, F.; SCHUH, W.-D.; SNEEUW, N. **Observation of the System Earth from Space - CHAMP, GRACE, GOCE and future missions**. Berlin: Springer, 2014. 190 p. (GEOTECHNOLOGIEN Science Report No. 20).

GEMAEL, C. **Introdução a Geodésica Física**. Curitiba: UFPR, 1999. 312 p.

GILARDONI, M.; REGUZZONI, M.; SAMPIETRO, D. GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. **Studia Geophysica Et Geodaetica**, [s.l.], v. 60, n. 2, p.228-247, 28 mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.1007/s11200-015-1114-4>.

GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). GGOS Focus Areas. 2021. Disponível em: < <https://ggos.org/about/org/fa/>>. Acesso em: 10 set. 2021.

GUIMARÃES, G. N.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D.. An evaluation of recent GOCE geopotential models in Brazil. **Journal Of Geodetic Science**, [s.l.], v. 2, n. 2, p.144-155, 1 jan. 2012. <http://dx.doi.org/10.2478/v10156-011-0033-8>.

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

HONKASALO, T. On the Tidal Gravity Correction. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, VI/21, 1964.

INCE, E. S.; BARTHELMES, F.; REIßLAND, S.; ELGER, K.; FÖRSTE, C.; FLECHTNER, F.; SCHUH, H. ICGEM – 15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services, and future plans. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 2, p.647-674, 2019. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. 2021.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). Resolution (No. 1) for the definition and realization of an International Height Reference System (IHRS). München, Alemanha, 2015. Disponível em: <https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2019.

INTERNATIONAL CENTRE FOR GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM). **Static Models**. 2019. Disponível em:< http://icgem.gfz-potsdam.de/tom_longtime>. Acesso em: 09 dez. 2019.

JENSEN, H. Formulas for the Astronomical Correction to the Precise Levelling. Danish Geodetic Institute. Meddeleise, 1949.

KVAS, A.; MAYER-GÜRR, T.; KRAUSS, S.; BROCKMANN, J. M.; SCHUBERT, T.; SCHUH, W-D.; PAIL, R.; GRUBER, T.; JÄGGI, A.; MEYER, U. The satellite-only gravity field model GOCO06s, **GFZ Data Services**. 2019. <http://dx.doi.org/10.5880/ICGEM.2019.002>. 2019.

LIANG W., Xu X., Li J., Zhu G., 2018:The determination of an ultra high gravity field model SGG-UGM-1 by combining EGM2008 gravity anomaly and GOCE observation data. **Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, 47(4): 425-434. <http://dx.doi.org/10.11947/j.AGCS.2018.20170269>.

MAYER-GÜRR, T. BEHZADPUR, S.; ELLMER, M.; KVAS, A.; KLINGER, B.; STRASSER, S.; ZEHENTNER, N.; ITS-G-Grace2018 - Monthly, Daily and Static Gravity Field Solutions from GRACE. **GFZ Data Services**. 2018. <http://dx.doi.org/10.5880/ICGEM.2018.003>.

MCGRANAHAN, G.; BALK, D.; ANDERSON, B. The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. **Environment And Urbanization**, [S.l.], v. 19, n. 1, p.17-37, abr. 2007. <http://dx.doi.org/10.1177/0956247807076960>.

MELO, L. F. S.; DE FREITAS, S. R. C. Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial para os estados do Maranhão e Piauí. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 2, p.203-224, abr/jun. 2012.

NICACIO, E; DALAZOANA, R. Comparação entre abordagens absoluta e relativa em determinações altimétricas baseadas em observações GNSS e Modelos Globais do Geopotencial. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s.l.], v. 70, n. 1, p.1-39, 31 mar. 2018. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv70n1-45188>.

PAIL, R.; FECHER, T.; BARNES, D.; FACTOR, J. F.; HOLMES, S. A.; GRUBER, T.; ZINGERLE, P. Short note: the experimental geopotential model XGM2016. **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 92, n. 4, p.443-451, 7 out. 2017. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-017-1070-6>.

PLAG, H-P.; BEUTHER, G.; GROSS, R.; HERRING, T. A.; RIZOS, C.; RUMMER, R.; SAHAGIAN, D.; ZUMBERGE, J. Introduction. In: Plag, H-P. Pearlman, M. The Global

Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. New York: Springer, 2009. p. 1-13.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-02687-4>.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System 3.22.** Open Source Geospatial Foundation Project. 2022. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/forusers/download.html>. Acesso em: 18 maio 2022.

RAPP, R. H. Past and future developments in Geopotential Modeling. In: FORSBERG, R.; FEISSEL, M. DIENHARD, D. **Geodesy on the Move.** Berlin New York: Springer-Verlag, 1998. p. 58-78.

SANCHÉZ, L.; CUNDERLÍK, R.; DAYOUB, N.; MIKULA, K.; MINARECHOVÁ, Z.; SÍMA, Z.; VATRT, V. VOJTÍSKOVÁ, M. A conventional value for the geoid reference potential W_0 . **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 90, n. 9, p.815-835, 23 maio 2016.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00190-016-0913-x>.

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. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggx025>.

SANSÒ, F.; SIDERIS, M. G. **Geoid Determination: Theory and Methods.** New York Dordrecht London: Springer, 2013. 733 p.

SANTANA, T. A. **Contribuições para os Estudos de Integração das Componentes Verticais Terrestre e Marinha ao Longo da Costa Brasileira.** 2020. 140 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 72, n. 2, p. 345–364, 2020.
<http://dx.doi.org/10.14393/rbcv72n2-52611>.

SANTOS, J. C.; CERQUEIRA, J. A. C.; JAMUR, K. P. Avaliação Estatística dos Modelos Geopotenciais EGM2008 e MAPGEO2004 no Município de Maceió – Alagoas. In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2010, Recife. **Anais...** Recife: UFPE - Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, p. 001-008, 2010.

TENZER, R.; VATRT, V.; ABDALLA, A.; DAYOUB, N. Assessment of the LVD offsets for the normal-orthometric heights and different permanent tide systems—a case study of New Zealand. **Applied Geomatics**, [s.l.], v. 3, n. 1, p.1-8, 7 dez. 2011. DOI. 1007/s12518-010-0038-5.

TORGE, W. **Geodesy**. 4th ed. Berlin; Boston: de Gruyter, 2012. x, 433 p.

Recebido: 18 mai. 2022

Aprovado: 15 out. 2022

DOI: 10.3895/rbgeo.v10n4.15503

Como citar: SANTANA, T. A.; SOARES, J. G.; GIEHL, S.; DALAZOANA, R. Avaliação de modelos globais do geopotencial em zonas costeiras do Brasil. **R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 10, n. 4, p. 295-314, out./dez. 2022. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Tulio Alves Santana

Rua Zulmira Canavarros, 95, CEP 78005-390, Cuiaba, Mato Grosso, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

