

Avaliação de Modelos Globais do Geopotencial em Zonas Costeiras do Brasil

Jayne Gambarine Soares

Ao longo dos anos, os lançamentos de diferentes missões para modelagem do campo da gravidade disponibilizaram um maior conjunto de observações geodésicas terrestres e aliado ao desenvolvimento da computação possibilitaram o cálculo de centenas de modelos de Terra, ditos, Modelos Globais do Geopotencial (MGGs). Um 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. O modelo é constituído por um conjunto de valores numéricos para certos parâmetros, chamados de coeficientes, com incertezas associadas, denominados de erros de propagação. Na concepção de um MGG são calculadas quantidades derivadas do potencial gravitacional, conhecidas também como funcionais do campo de gravidade (SANSÒ; SIDERIS, 2013). São exemplos de funcionais: os distúrbios de gravidade, as anomalias de gravidade, as anomalias de altitude, as altitudes geoidais, os valores de gravidade sobre a superfície terrestre e sobre o elipsoide, entre outras (BARTHELMES; INCE; REIBLAND, 2017). Diversos autores realizaram pesquisas a fim de avaliar o comportamento dos MGGs em regiões brasileiras ou no país como um todo. Todas as pesquisas foram baseadas na avaliação relativa ou absoluta considerando estações geodésicas que possuíam altitudes referidas ao elipsoide e (quase) geoide simultaneamente, ou seja, avaliação GNSS(GPS)/Nivelamento. Os resultados destas pesquisas podem, em alguma medida, direcionar indicativos de modelos com melhor adequação ao Brasil. Embora as zonas costeiras concentrem 10% da população mundial e 13% da população urbana mundial (MCGRANAHAN; BALK; ANDERSON, 2007), as avaliações de MGGs ainda são pouco exploradas nestas regiões. É fato que essas zonas 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 alcançar os objetivos (SANTANA, DALAZOANA, 2020). Com isso, os objetivos desta pesquisa são amplos no âmbito do cumprimento dos almejos da Geodésia moderna. Assim sendo, busca-se trabalhar com avaliação de dados 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. Nesta pesquisa, espera-se responder sobre a adequação dos MGGs em zonas costeiras no Brasil, a fim de contribuir com os esforços inerentes à implementação do Sistema de Referência Altimétrica Internacional (IHR - International Height Reference System) (SÁNCHEZ; SIDERIS, 2017) e também na busca por alternativas para a integração dos componentes verticais em zona costeira (SANTANA, 2020). Estudos em zonas costeiras e com finalidade de contribuir com a investigação e o monitoramento dos comportamentos nestas zonas vão de encontro aos objetivos da Geodésia e do Global Geodetic

Observing System (GGOS). A região de estudo dessa pesquisa é a zona costeira do Brasil, a qual foi delimitada em um raio de 210 km a partir da linha de costa brasileira. Nessa região se encontram 550 estações do SGB que 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 Planialtimétrica e Rede Altimétrica. 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 1995-2020. Essas visitas consistem em uma inspeção do marco geodésico cuja situação e data da visita constam do relatório da estação. Com relação a 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, assim pode-se dizer que elas são consideravelmente recentes. Outra informação dada nessa inspeção diz respeito a situação da estação, que consiste em: boa, destruída e não encontrada. Foi notado que em sua maioria, ou seja, 481 estações encontram-se em bom estado de conservação, 35 delas foram destruídas e 34 não foram encontradas. Todos os dados das estações foram obtidos junto ao Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE no formato de arquivos vetoriais. Os MGGs foram extraídos do ICGEM (International Center for Global Gravity Field Models). O critério de seleção dos modelos levou em conta os resultados das avaliações GNSS(GPS)/Nivelamento em todo o território brasileiro disponibilizados pelo ICGEM, além do grau de desenvolvimento dos modelos. Foram selecionados os MGGs com grau de desenvolvimento maior que 300 e RMSE (Root Mean Square Error) menor que 50 cm. Treze (13) modelos atenderam a estes critérios, dentre os quais 8 modelos possuem o grau máximo acima de 1420, 10 o grau máximo acima de 720 e 3 o grau máximo acima de 359. Os modelos são: XGM2019e_2159, XGM2016, EIGEN-6C2, GOCO05c, SGG-UGM-1, EIGEN-6C4, EIGEN-6C3stat, EIGEN-6C, GECO, EGM2008, GGM05C, GIF48 e EIGEN-51C. A avaliação por GNSS(GPS)/Nivelamento pode ser feita utilizando dois métodos, o absoluto e o relativo (NICACIO; DALAZOANA, 2018). O método absoluto empregado nesse estudo é consolidado com 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). Neste estudo, as informações de latitude, longitude, altitude elipsoidal e altitude normal de cada estação foram obtidas junto ao BDG do IBGE; e a obtenção da anomalia de altitude (ζ^{modelada}) das estações foi feita através do serviço de cálculo do ICGEM. No serviço do ICGEM, são necessárias algumas definições/escolhas para o cálculo de funcionais do campo da gravidade, tais como: as coordenadas dos pontos de cálculo; o MGG de interesse; a funcional desejada; o grau de desenvolvimento do modelo; o sistema geodésico de referência; o sistema de maré permanente e aplicação ou não do termo de ordem zero. Para uma análise correta dos resultados é necessário que o sistema de maré permanente ao qual os dados estejam vinculados seja compatível, por isso optou-se por adotar o sistema de maré médio considerando as recomendações internacionais para o estabelecimento do ITRS (IAG, 2015) e como elipsoide de referência o GRS80.

Para a realização das análises, foi necessária a conversão da altitude elipsoidal das estações GNSS para o sistema de maré médio. 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, uma vez que 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 dos dados no mesmo sistema de maré permanente, foram calculadas as anomalias de altitude (ζ) para as estações e comparadas com os valores obtidos para as 550 estações pelo ICGEM. A partir dos valores de RMSE e desvio padrão analisou-se os 13 MGGs. Para tanto, os MGGs foram divididos em quatro categorias: A primeira considerou os modelos com grau de desenvolvimento máximo; a segunda com grau de desenvolvimento mais 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). 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. 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. 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. Por fim, se apresenta uma análise baseada no grau de desenvolvimento até 360 para os 13 modelos estudados. 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. 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 desvio padrão na grande maioria dos cenários analisados mesmo com grau de desenvolvimento mais elevado. 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 analisado todos os modelos com desenvolvimento até 360 apresentou menor desvio padrão e RMSE.