

COMPARAÇÃO DA ALTURA GEOIDAL DO MAPGEO2015 E GNSS/NIVELAMENTO COM A ONDULAÇÃO GEOIDAL DERIVADA DA MISSÃO GOCE

T. A. Santana¹, L. C. Ribeiro², G. do N. Guimarães¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Brasil

²Universidade Estadual Paulista, Brasil

Comissão II – Geodésia, Astronomia, Topografia e Agrimensura

RESUMO

Este estudo buscou comparar a ondulação geoidal do MAPGEO2015 e de estações GNSS/Nivelamento com a ondulação geoidal proveniente de modelos do geopotencial da missão espacial GOCE. No total, foram selecionadas 122 estações (referências de nível com conexão com a rede GNSS) contidas no estado de Minas Gerais. Da missão GOCE foram utilizados os modelos EIGEN-6C4, EIGEN-6S4 e GECO obtidos no site do ICGEM. Por meio de Krigagem e a partir do *software* Surfer foram obtidos os valores da altura para cada estação em cada um dos três modelos do geopotencial. Após as comparações e análises, foi possível constatar que dentre os modelos comparados com o GNSS/Nivelamento o MAPGEO2015 é o modelo que mais se adapta, por possuir menor desvio padrão das discrepâncias. Os valores de altura geoidal da missão GOCE melhor se adaptaram com os valores do MAPGEO2015. Entre os modelos, o EIGEN-6S4 apresentou menor discrepância quando comparado com o GNSS/Nivelamento e o GECO menor discrepância na comparação com o MAPGEO2015.

Palavras chave: Ondulação geoidal, GNSS/Nivelamento, Modelos geoidais

ABSTRACT

This study aimed to compare the geoid undulation from MAPGEO2015 and GNSS/Leveling stations with the geoid undulation from GOCE geopotential models. A total of 122 stations (level references connected to the GNSS network) contained in the state of Minas Gerais were selected. From GOCE mission, EIGEN-6C4, EIGEN-6S4 and GECO models obtained on the ICGEM website were used. From Kriging and the Surfer software, height values were obtained for each station in each of the three geopotential models. After the comparisons and analyzes, it was possible to verify that among the models compared with the GNSS/Leveling, the MAPGEO2015 is the model that best fits the purpose, since it has the lowest standard deviation of the discrepancies. The geoid height values of the GOCE mission were best adapted to the MAPGEO2015 values. Among the models, the EIGEN-6S4 presented less discrepancy when compared to the GNSS/Leveling and the GECO less discrepancy in comparison with the MAPGEO2015.

Keywords: Geoid undulation, GNSS/Leveling, Geoid models

1- INTRODUÇÃO

Geodésia é a ciência que estuda a forma e as dimensões da Terra, o campo de gravidade e suas variações temporais. De origem grega a palavra significa “particionando a Terra” (BLITZKOW, 2002). Com isso, para alcançar seus objetivos a Geodésia é dividida em três áreas, sendo elas: Geodésia Geométrica que realiza medidas angulares e lineares da superfície em conjunto a algumas determinações astronômicas. Geodésia Celeste, que utiliza de técnicas espaciais e por fim a Geodésia Física, que ajuda a conhecer detalhadamente o campo de gravidade do

planeta através de medições gravimétricas a fim também do modelamento geoidal. Entretanto, essa divisão já não tem sentido, pois, atualmente há uma interação entre as três (GUIMARÃES, 2010).

A modelagem do geóide é alvo de grandes esforços na Geodésia, uma vez que não é uma superfície geométrica e regular. Trata-se de uma superfície equipotencial do campo de gravidade, que melhor se adapta ao nível médio global dos mares. A partir de um modelo geoidal é possível obter a ondulação geoidal (N), que corresponde à separação,

na componente vertical, entre a superfície geoidal e a superfície elipsoidal.

Esta ondulação combinada com medições conduzidas por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) pode-se resultar na altitude ortométrica. O emprego dessa altitude é de suma importância em trabalhos de grande porte da engenharia (construção de rodovias e linhas férreas), além de trabalhos que envolvam água (construção e monitoramento de barragens hidrelétricas, transposição de rio, entre outros).

No Brasil, o cálculo desta altitude também é feito por meio de linhas de nivelamento, resultantes do nivelamento geométrico de alta precisão, onde é aplicado a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais (IBGE, 2011). O nivelamento geométrico é o método mais utilizado para a obtenção de tal altitude, porém demanda tempo e profissionais competentes. Devido à extensão do Brasil, a determinação de uma rede de nivelamento demandou grande esforço.

A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), começou a ser feita em 1945 pelo IBGE. Esta, partiu da primeira referência de nível que se localiza em Santa Catarina no município de Urussanga. No ano seguinte este nivelamento chegou ao marégrafo de Torres, localizado no Rio Grande do Sul, o que possibilitou a associação da altitude para as estações de referência criadas (IBGE, 2011). Posteriormente, no ano de 1958, esse marégrafo foi substituído pelo atual marégrafo, o de Imbituba, localizado no estado de Santa Catarina, e também foi criado o Datum de Santana.

Como já citado, a partir do uso do GPS (*Global Positioning System*), juntamente com ondulações geoidais vindas de modelos de alta resolução é possível obter altitudes referidas ao geóide. Para isso, é necessário que se tenha um modelo geoidal de alta precisão e que seja compatível com o sistema altimétrico ou ainda um modelo geopotencial com os mesmos fatores e um conjunto de estações GPS sobre nivelamento.

Um exemplo de modelos do geopotencial advindas de missões espaciais, são os modelos advindos da missão GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*), que utilizou técnicas SST (*Satellite-to-satellite Tracking*) e de gradiometria SGG (*Satellite Gravity Gradiometry*). Nesta missão, a modelagem do campo de gravidade a partir do espaço, não era baseada puramente nas perturbações de órbita, porque ela media do espaço os gradientes de gravidade de forma direta (JAMUR et al., 2010). Além disso, ele também continha um receptor GPS de dupla frequência para determinar a órbita do satélite GOCE e derivar informação de gravidade a partir dessa órbita (ALVES, 2007).

São fornecidos no site do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*) vários modelos do campo de gravidade, podendo ser acessado pelo link: <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>>. Não somente da missão GOCE estão disponíveis, mas também os resultantes de outras missões espaciais. Os valores são obtidos em grade, do tamanho escolhido pelo usuário. Assim, para obter valores para o ponto de interesse é necessário realizar interpolação, que neste trabalho foi usado a Krigagem

A Krigagem é uma ferramenta de análise geoestatística, e pode ser entendida como um estimador que se baseia numa série de técnicas de análise de regressão, lineares ou não. Ela procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio levando em consideração a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço (NOGUEIRA; AMARAL, 2009).

Essa técnica tem capacidade de produzir melhores estimativas em termos de interpolação, porque está embasada em duas premissas: não-tendenciosidade do estimador e variância mínima das estimativas. Além disto, quando se trabalha considerando a dependência espacial, podem-se reduzir os erros aleatórios pelo controle de parcela deste erro associada à dependência espacial (MELLO et al., 2003).

Além destes modelos globais, existe para o Brasil um modelo de ondulação geoidal oficial, o MAPGEO2015, que é resultado de esforços do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). O cálculo deste modelo contou com mais 18.485 novas estações gravimétricas, o que resultou numa melhora de 20% no modelo geoidal anterior, o MAPGEO2010 (BLITZKOW et al., 2016).

O modelo de geopotencial usado como referência, foi elaborado pelo GFZ/Postdam e GRST/Toulouse, chamado EIGEN-6C4 (*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*). Esse modelo é considerado completo com grau e ordem até 2190, tendo sido determinado com a contribuição das informações gravimétricas dos satélites: LAGEOS (*Laser Geodynamics Satellite*), GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e GOCE, e dos modelos DTU12 e EGM2008 (BLITZKOW et al., 2016). Nas áreas onde não tinha informação gravimétrica suficiente, foi utilizado Redes Neurais Artificiais para calcular as anomalias de Helmert em pequenas áreas.

Diante destas possibilidades de cálculo da ondulação geoidal, este trabalho visa realizar a comparação entre as ondulações geoidais resultante de GNSS/Nivelamento, do MAPGEO2015 e a ondulação geoidal derivada da missão GOCE, para estações SAT/GPS com conexão com RN.

Este trabalho tem por objetivo comparar e discutir os valores de altura geoidal advindas do MAPGEO2015 com aqueles provenientes de dados GNSS sobre nivelamento. Além disso, comparar com valores de ondulação geoidal derivados da missão GOCE.

2- MATERIAL E MÉTODOS

Nesta etapa é descrito como foi realizado o cálculo das ondulação geoidal para os três métodos analisados neste trabalho, bem como a área de estudo.

2.1- ÁREA DE ESTUDO

A análise das ondulação geoidal calcula pelos métodos de GNSS/Nivelamento, MAPGEO2015 e modelos derivados da missão GOCE foi realizada para estações do tipo SATGPS localizadas no estado de Minas Gerais, Brasil.

Foram escolhidas todas as estações que possuíam conexão com RN. As estações que estão com status de não encontrada foram consideradas, porém as estações que estão destruídas não foram consideradas.

Ao todo foram analisadas 122 estações, cujas localizações estão representadas na Fig. 1. Os dados foram extraídos no relatório de cada estação, encontrado no site do IBGE.

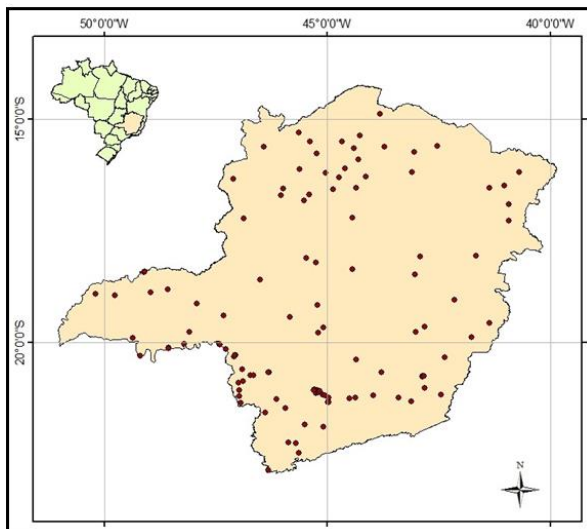


Fig. 1 – Localização das estações SAT/GPS com conexão com RN.

2.2- ONDULAÇÃO GEOIDAL ADVINDA DE GNSS/ NIVELAMENTO E MAPGEO2015

O cálculo da ondulação geoidal nesta etapa foi realizado através da diferença entre a altitude geométrica e a altitude ortométrica, as quais foram encontrados no relatório da estação.

Com este relatório, foram extraídas as coordenadas de cada estação, além das altitudes. A partir destas coordenadas, foi gerado um documento, no formato .txt para a importação no MAPGEO2015. Ele foi formatado de acordo com o exemplo dado no software e através da sua importação foi realizado o cálculo e gerado um arquivo de saída, contendo os valores da ondulação geoidal para cada ponto.

Para a análise, foi calculada a diferença entre as duas ondulações, para cada ponto, e, no final, realizado o cálculo da média, desvio padrão, discrepância máxima e mínima, desta discrepância.

3.2- ONDULAÇÃO GEOIDAL ADVINDA DA MISSÃO GOCE

Foram analisados os modelos de ondulação geoidal EIGEN-6C4, EIGEN-6S4 e GECO derivados da missão GOCE. Primeiramente foi realizado o download dos dados de cada modelo, no site do ICGEM, para um grid que cobria toda a região do estado de Minas Gerais.

Os valores foram calculados, para cada modelo, em uma grade de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, para todo o estado. Para obter os valores de ondulação nos pontos de interesse, foi necessário realizar uma interpolação, que foi feita pelo método de Krigagem.

Esta interpolação foi realizada no software Surfer, na sua versão gratuita para experimentação. Foi feita, portanto, a interpolação para os três modelos de ondulação geoidal, derivados da missão GOCE, citados acima.

Neste software a interpolação é feita inserindo os valores de uma tabela do Excel, e por padrão o método de interpolação apresentado na ferramenta GridData é a interpolação por Krigagem. Assim, ele gera um arquivo no formato de grid. Posteriormente, deve-se extrair as informações dos valores interpolados para os pontos de interesse.

Ao final, para cada estação foi aplicado o termo de ordem zero, para que pudesse ser realizada a comparação de forma correta entre os modelos do geopotencial e os valores advindos do GNSS/Nivelamento. O termo de ordem zero é a diferença entre os elipsoides do GNSS e dos modelos do geopotencial.

3- RESULTADOS E DISCUSSÕES

Percebe-se que os valores de ondulação geoidal calculados pelo método GNSS/Nivelamento apresentaram maior média das discrepância com relação aos valores da ondulação geoidal obtidos por meio do software MAPGEO2015, em contrapartida, apresenta valores mais homogêneos, uma vez que o desvio padrão das amostras é menor, e a média se comparada com os outros modelos é maior.

Enquanto que os modelos derivados da missão GOCE apresentaram valores de desvio padrão e média bem próximos entre si, o que apresentou menor média das discrepâncias foi o EIGEN-6S4, o EIGEN-6C4 e o GECO apresentaram menor desvio padrão (TABELA 1).

TABELA 1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDULAÇÕES GEOIDAIS DO GPS/NIVELAMENTO COM OS OUTROS MÉTODOS

Modelo	Média (m)	Desv. Pad. (m)	Máx. (m)	Mín. (m)
MAPGEO2015	0,085	0,164	0,943	-0,218
EIGEN-6C4	0,037	0,373	1,246	-1,504
EIGEN_6S4	0,025	0,386	1,000	-1,506
GECO	0,039	0,373	1,190	-1,538

Fonte: Os autores.

Assim como a análise anterior, a discrepância entre os modelos derivados da missão GOCE apresentaram valores bem próximos entre si (TABELA 2). Os valores provenientes do MAPGEO2015 melhor se adaptaram com os valores provenientes do modelo GECO, pois este apresentou menor desvio padrão nas discrepâncias dos pontos e também menor média em módulo. Porém, como dito anteriormente, a diferença foi bem pequena em relação aos outros.

TABELA 2 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DA COMPARAÇÃO ENTRE AS ONDULAÇÕES GEOIDAIS DO MAPGEO2015 COM OS MODELOS DA MISSÃO GOCE

Modelo	Média (m)	Desv. Pad. (m)	Máx. (m)	Mín. (m)
EIGEN-6C4	-0,049	0,330	0,969	-1,286
EIGEN-6S4	-0,060	0,347	0,736	-1,288
GECO	-0,046	0,329	0,913	-1,320

Fonte: Os autores.

Ao verificar a distribuição espacial das discrepâncias em cada estação percebeu-se que as maiores discrepâncias nas anomalias de altura obtidas com o método GNSS/Nivelamento e MAPGEO2015, estão na região sul do estado de Minas Gerais. Ou seja, existe uma correlação visual deste erro (Fig. 2).

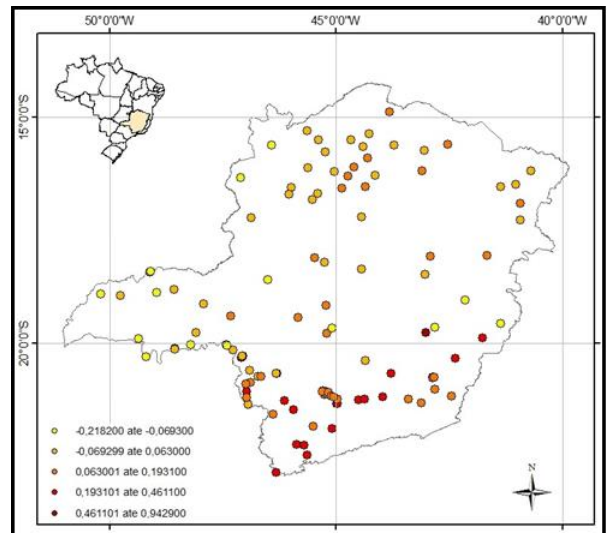


Fig. 2 – Mapa da discrepância na ondulação geoidal entre os métodos GNSS/Nivelamento e MAPGEO2015.

As discrepâncias entre GNSS/Nivelamento e os modelos geoidais derivados da missão GOCE e as discrepâncias entre as alturas geoidais do MAPGEO2015 e os modelos derivados da missão GOCE não apresentaram um padrão tão nítido como o citado acima.

Porém, ainda assim, pode-se perceber que as maiores discrepâncias ocorreram no sudoeste e no norte do estado, para todos os modelos. Por exemplo, a comparação entre o MAPGEO2015 e EIGEN_6C4, resultou em uma média da discrepância entre os métodos de cálculo da altura geoidal de aproximadamente 50 cm, com um desvio padrão aproximado de 59 cm (Fig. 3).

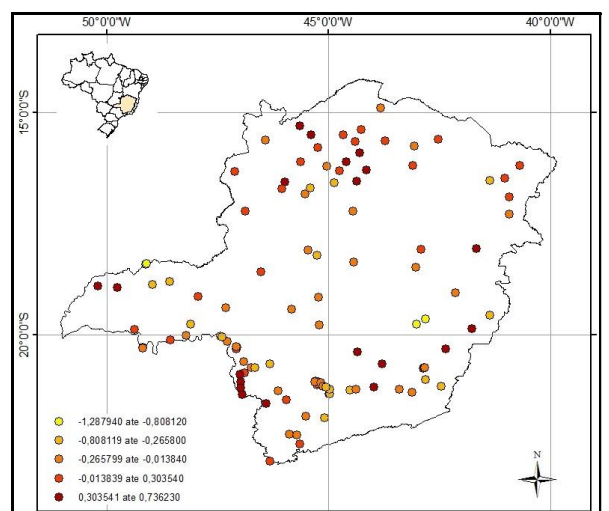


Fig. 3 – Mapa da discrepância na ondulação geoidal entre os métodos MAPGEO2015 e o modelo EIGEN_6C4.

4- CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo das alturas geoidais é importante pois ela combinada com o valor da altitude geométrica, obtida por técnicas de GNSS, obtém-se o valor da altitude ortométrica, que por sua vez é de grande importância em obras de engenharia e também que envolvam água.

O melhor modelo de ondulação geoidal, entre os analisados neste trabalho, quando comparado com as alturas geoidais obtidas pelo GNSS/Nivelamento é o MAPGEO2015, uma vez que, ele apresentou menor desvio padrão em relação aos outros, afirmando assim que ele é o modelo mais consistente para a área estudada.

Ainda, na comparação entre estes dois métodos percebe-se que as maiores discrepâncias entre as alturas geoidais concentra-se na região sul do estado de Minas Gerais, que pode ser explicado pelo fato de que é a região com predominância de altos valores de altitude.

Os modelos de ondulação geoidal derivados da missão GOCE melhor se adaptaram com os valores de altura geoidal do MAPGEO2015 do que com as ondulações calculadas por GNSS/Nivelamento, devido ao menor desvio padrão entre eles. Dentre os modelos, o EIGEN-6S4 apresentou melhores resultados de discrepância, quando comparado aos outros modelos, para GNSS/Nivelamento, para o MAPGEO2015 o GECO apresentou melhores resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A. P. Sobre a Técnica Fast Collocation (Colocação Rápida) na Determinação do Geóide do Estado de São Paulo Utilizando Dados das Missões Champ e Grace. 2007. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

BLITZKOW, D. Geodésia - Definição. Universidade de São Paulo. 2002. Disponível em: <<http://sites.poli.usp.br/ptr/lgt/FTP/dgps2201-07-v1.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2017.

BLITZKOW, D.; MATOS, A. C.O. C; MACHADO, W. C.; NUNES, M. A.; LENGROBER, N. V.; XAVIER, E. M. L.; FORTES, L. MAPGEO2015: o novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, v. 68, n. 10, p.1873-1884, Nov/Dez, 2016.

GUIMARÃES, G. N. A altimetria e o modelo geoidal no estado de São Paulo. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Relatório do Ajustamento Simultâneo da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro. 2011. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/documentos/geodesia/relatori_oajustamento.pdf>. Acesso em: 14 de jun. 2017.

JAMUR, K.P.; MELO, L.F.S; DE FREITAS, S.R.C.; Avaliação dos modelos do campo da gravidade terrestre advindos da missão GOCE - GRAVITY FIELD AND STEADY-STATE OCEAN CIRCULATION EXPLORER. Presentado en la Reunión SIRGAS 2010, noviembre 11 y 12, Lima, Perú, 2010

MATOS, A. C. O. C; BLITZKOW, D.; GUIMARÃES, G. N.; LOBIANCO, M. C. B.; COSTA, S. M. A. Validação do MAPGEO2010 e Comparação com Modelos do Geopotencial Recentes. Bol. Ciênc. Geod., sec. Artigos, v. 18, no 1, p.101-122. Curitiba, 2012.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Ciências do Solo. 2003.

NOGUEIRA, J. D. L; AMARAL, R. F. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Natal, abr. 2009.