

Avaliação da correção gravimétrica do terreno calculada a partir de Modelos Digitais de Elevação e associados ao Sistema Geodésico Brasileiro e ao EGM2008

Karoline Paes Jamur

Universidade Federal do Paraná, karol.mestrado@ufpr.br

Rogers A. D. Pereira

Universidade Federal do Paraná, r51505150@gmail.com

Silvio Rogério Correia de Freitas

Universidade Federal do Paraná, sfreitas@ufpr.br

Fabiani D. Abati Miranda

Universidade Federal do Paraná, fabi.miranda@ufpr.br

Resumo

A avaliação dos curtos comprimentos de onda do geopotencial normalmente está vinculada aos efeitos gravimétricos da topografia do terreno. Em vista da ausência de informação altimétrica em resolução adequada, utilizam-se modelos digitais de elevação, os quais têm como referência sistemas de altitudes globais, ao contrário de, por exemplo, o caso brasileiro, onde as altitudes estão vinculadas a um sistema local. Neste trabalho busca-se avaliar o quão diferente pode ser este efeito, levando em conta altitudes fornecidas pelo Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e altitudes fornecidas pelo modelo digital de elevação Digital Topographic Model 2006.0 (DTM2006.0), o qual é o Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado para calcular o Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) que é um modelo de geopotencial global. Para isto, foi produzido um aplicativo para efetuar o cálculo das correções do terreno a partir de dados do DTM2006.0 (vinculado ao EGM2008) e do SGB por aproximação linear. Com estes resultados foi possível quantificar o efeito do emprego de correções do terreno, em diferentes sistemas de referência, via o cálculo de anomalias de altitude.

Palavras-chave: Correção do Terreno; Modelo Digital de Elevação; Sistema Geodésico Brasileiro; EGM2008.

Evaluation of gravimetric terrain correction computed from Digital Elevation Models and associated with the Brazilian Geodetic System and the EGM2008.

Abstract

The evaluation of the short wavelengths of the geopotential is usually linked to the gravimetric effect of topography of the land. Because of the lack of information on proper resolution, altimetry was used through digital elevation models, which have global height reference systems, unlike, for example, the Brazilian case, where the elevations are linked to a local system. In this study, seek to assessed how different can be this effect, taking into account heights provided by the Brazilian Geodetic System (BGS) and heights provided by the digital elevation model DTM2006.0 (used to compute the global geopotential model EGM2008). For this, an application was built to carried out the calculation of terrain corrections from data DTM2006.0 and BGS by linear approximation. With these results, it was possible to calculate the terrain effect correction using different vertical reference systems through the height anomaly computation.

Keywords: Terrain Correction; Digital Elevation Model; Brazilian Geodetic System; EGM2008.

1. Introdução

Um passo imprescindível no cálculo do geóide a partir de dados gravimétricos com resolução decimétrica, por exemplo, tal como exigido nas aplicações atuais, como a vinculação de dados GNSS (Global Navigation Satellite System), é o cálculo das anomalias da gravidade com a consideração dos efeitos gravitacionais das massas topográficas. Na atualidade, o cálculo da

correção do terreno, de forma sistemática, tem sido possível com a utilização de modelos digitais de elevação (MDE) do terreno, locais ou globais.

A anomalia de Bouguer é obtida a partir da correção Bouguer, que remove o efeito das massas entre a estação e o geóide e também a correção ar-livre. Uma correção simplificada é feita levando em consideração a hipótese de que entre o ponto e o geóide existe uma placa infinita plana e horizontal, com densidade ρ constante e espessura equivalente a altitude do ponto. Já, a correção de Bouguer completa, além de remover os efeitos da placa plana infinita na redução da estação ao geóide, considera os efeitos da topografia relativa à placa via a correção do terreno, sempre positiva. Efetivamente, o cálculo da anomalia de Bouguer é feito pela soma da correção de Bouguer simples ou completa com a correção ar-livre assumindo que o espaço entre o plano da estação e o plano do geóide, seja preenchido uniformemente com massa, no caso de uma estação situada acima do geóide e uniformemente sem massa se estiver abaixo do geóide. No caso da anomalia isostática considera-se também, a correção topo-isostática, a qual envolve também a consideração de heterogeneidades de massa abaixo do geóide, entendidas como massas de compensação da topografia acima do geóide. A eliminação dos efeitos das massas topográficas e de compensação para a redução da gravidade observada ao geóide é bastante complexa.

Com a aplicação da correção de terreno nas anomalias gravimétricas, as massas externas ao Geóide são verticalmente comprimidas sob o Geóide, conseqüentemente, o potencial gravitacional da Terra é alterado. A diferença entre o potencial gravitacional das massas topográficas antes da correção e depois do processo de redução é chamado de efeito indireto do Potencial sendo a alteração correspondente ao geóide denomina-se efeito indireto. Quando utiliza-se a anomalia gravimétrica de Faye (anomalia gravimétrica com correção ar-livre, correção atmosférica e correção de terreno), a superfície equipotencial definida é chamada de Co-Geóide. Com a adição do efeito indireto no Co-Geóide, determina-se a superfície do Geóide.

Atualmente a correção do terreno pode ser obtida com base em MDEs onde se tem maior facilidade de cálculo por serem fornecidos em arquivos das elevações em grades de diferentes tamanhos e oferecendo a oportunidade do uso de outros métodos como, por exemplo, o de prismas retangulares ou método de decomposição espectral da topografia por FFT – Fast Fourier Transform.

Nesta contribuição, o efeito do terreno é obtido por aproximação linear para explorar as potencialidades do uso de altitudes advindas do modelo digital de elevação

Digital Topographic Model 2006.0 (DTM2006.0) compilado em uma resolução de 30" (Pavlis, 2007) para o cálculo do geóide comparando com as vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Para isso foi criado um aplicativo para realizar o cálculo da correção do terreno a partir de dados do DTM2006.0 e do SGB por aproximação linear e outro aplicativo para o cálculo das anomalias de altura pela teoria de Molodenskii.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Altitudes – SGB

O sistema de altitudes do SGB é materializado com a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Esta rede é formada pelas estações geodésicas altimétricas denominadas Referências de Nível (RN's). As estações altimétricas são estabelecidas com Nivelamento Geométrico Composto com o objetivo final de gerar altitudes com a precisão necessária ao estabelecimento do controle fundamental em vista da necessidade para: estudos e pesquisas da forma da Terra e do movimento da crosta terrestre; controle altimétrico das grandes obras de engenharia; apoio para obtenção da altitude dos pontos necessários a elaboração de cartas topográficas; apoio a serviços topográficos e geodésicos em geral; construção de barragens, redes distribuidoras de água, etc. (IBGE, 2010).

2.2 Digital Topographic Model 2006.0 (DTM2006.0)

O DTM2006.0 é um MDE global que incorpora os dados Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) disponíveis. Foi compilado com resoluções de 30", 2', 5', 30', e de 1°. O EGM2008 (qual utiliza dados do DTM2006.0) combina informações de anomalias da gravidade de grau baixo, com informações de grau elevado dos efeitos advindos do Residual Terrain Model (RTM), baseado no DTM2006.0, com isso, matematicamente produziu-se valores de anomalias da gravidade sobre as áreas onde seus dados não estão disponíveis. Estes valores sintéticos de anomalia de gravidade foram necessários no desenvolvimento de soluções do modelo gravitacional com desenvolvimento harmônico até o grau 2160, preservando as devidas características espectrais (Pavlis et al. 2006).

2.3 Correção do Terreno

Nas reduções topográficas e isostáticas da gravidade, o efeito indireto sobre o potencial gravitacional, decorrente da aparente movimentação de massas, tem de ser considerado para uma correta determinação do geóide. Nos modernos conceitos da modelagem do campo da gravidade local e regional, a abordagem "Residual Terrain

Model” (RTM) é frequentemente aplicado na técnica Remover-Restaurar (RR) onde a massa, entre a superfície da Terra e uma superfície limitante, tem de ser levada em conta, tanto quando é removida, como quando é restaurada. Segundo Heck e Seitz (2007), embora a base de fórmulas analíticas para o cálculo dos efeitos de massa sobre a gravidade e sobre o potencial gravitacional seja relativamente simples, uma avaliação precisa consome algum tempo devido à estrutura irregular das superfícies limitantes das massas. O tempo de cálculo ainda é um problema hoje em dia, quando MDEs de alta resolução (com resolução vertical de até 9 m, como é o caso do SRTM e de 2m para o novo conceito TanDEM-X e TerraSAR-X) são utilizados. Potencialmente, tais modelos podem ser aplicados em conexão com modelos digitais de densidade. As operações de integração numérica têm de ser resolvidas, em princípio, estendendo ao longo de todo o globo com varreduras horizontais. Na Geodésia e Geofísica, muitos procedimentos para um cálculo eficiente (prismas, FFT, tesseóides, Heck e Seitz, 2007) dos efeitos de massas topográficas foram propostos e adaptados a ferramentas computacionais disponíveis atualmente otimizando essas operações de cálculo.

2.4 O Cálculo do geóide

Para o cálculo da altura geoidal em um único ponto da Terra é necessário o conhecimento de anomalias da gravidade sobre toda a superfície do planeta. Esta condição é traduzida claramente na equação de Pizetti-Stokes:

$$N = \frac{R}{4\pi\gamma} \iint_{\sigma} \Delta g \cdot S(\psi) d\sigma \quad (1)$$

$S(\psi)$ é a função de Stokes. A primeira constatação deve-se ao problema clássico das anomalias da gravidade serem calculadas sobre o Geóide em um processo no qual este é justamente o elemento incógnito. Usualmente isto conduz à sua referência a sistemas locais. A segunda, é que a anomalia da gravidade utilizada tem que ser representativa do elemento de área escolhido. Uma terceira refere-se a como tratar as informações em uma grade ou “template” (Hofmann-Wellenhof & Moritz, 2005), uma vez que a gravidade é observada de forma esparsa e aleatória na SFT (Superfície física terrestre).

No sentido de contornar os problemas acima e outros mais não apresentados aqui, técnicas alternativas de avaliação da equação (1) foram desenvolvidas. Dentre as mais famosas, é possível citar-se o RR, onde os

comprimentos do geopotencial são divididos em longos, médios e curtos. Os longos estão vinculados a informações que advém de modelos globais da gravidade; os médios, às anomalias da gravidade regionais e, os curtos, às informações da topografia do terreno. Cita-se aqui, particularmente a forma como é calculada a correção do terreno (Moritz, 1980), aplicada ao cálculo de anomalias Bouguer refinadas (para interpolação de valores da gravidade) e o termo g_1 de Molodenskii (apresentado na seção seguinte):

$$CT = \frac{1}{2} G\rho \iint_{\sigma} \frac{(H - H_p)^2}{l^3} d\sigma \quad (2)$$

Onde l é a distância entre os pontos H e H_p , G é a constante gravitacional e ρ é densidade média do Terreno, interpretada, de um modo geral, como sendo 2670 kg/m³. Aqui se chama atenção para o modo como as altitudes são calculadas, embora de modo relativo, associadas a um sistema de referência.

Quando, então, faz-se uma operação do tipo:

$$N = N_C + N_M + N_L \quad (3)$$

Com índices C (curtos), M (médios) e L (Longos) associados ao espectro do geopotencial pode-se encontrar anomalias da gravidade (médios comprimentos) vinculadas a um referencial local, e a topografia do terreno (curtos comprimentos de onda) vinculadas, normalmente, a um sistema global.

2.5 O Cálculo do quase-geóide segundo Molodenskii

De acordo com Hofmann-Wellenhof & Moritz (2005), anomalias de altura podem ser calculadas segundo a seguinte expressão:

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma_0} \iint_{\sigma} (\Delta g + g_1) S(\psi) d\sigma \quad (4)$$

A anomalia de altura pode ser útil na avaliação do quão grande podem ser as discrepâncias devido às incompatibilidades de Datum, antes mencionadas. É necessário lembrar que o termo g_1 pode ser compreendido como a correção do terreno para o local em questão.

3. Região de Estudos

A região de estudos envolve as latitudes 28,0°S a 28,5°S e longitudes 50,5°W a 48,5°W, compreendendo parte do Estado de Santa Catarina (Figura 1).

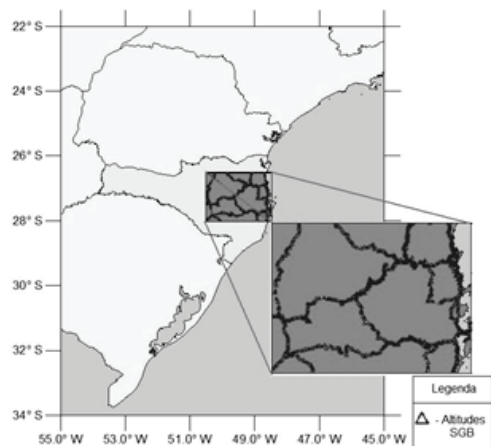


Figura 1: Área de estudos.

A motivação desta quadrícula deve-se parcialmente ao não conhecimento das informações altimétricas na parte oceânica e que têm como referência o SGB e também porque nestas localidades já foram desenvolvidos outros trabalhos que possibilitaram testes de conformidade com os resultados apresentados.

4. Metodologia

Deseja-se avaliar qual o efeito de se utilizar altitudes referidas ao DTM2006 em vez de utilizarem-se altitudes referidas ao SGB quando o geóide é calculado em relação ao SGB. Assim, a partir da equação (4), é possível operar:

$$\begin{aligned} & \zeta_{SGB} - \zeta_{DTM2006} \\ &= \frac{R}{4\pi\gamma_0} \iint_{\sigma} (\Delta g_{SGB} + g_{1-SGB}) S(\psi) d\sigma \\ & - \frac{R}{4\pi\gamma_0} \iint_{\sigma} (\Delta g_{DTM2006} + g_{1-DTM2006}) S(\psi) d\sigma \end{aligned} \quad (5)$$

Admitindo que as anomalias da gravidade estejam no mesmo referencial,

$$\begin{aligned} & \zeta_{SGB} - \zeta_{DTM2006} \\ &= \frac{R}{4\pi\gamma_0} \iint_{\sigma} (g_{1-SGB} - g_{1-DTM2006}) S(\psi) d\sigma \end{aligned} \quad (6)$$

E então é possível obter-se a diferença devido a aproximação de um modelo digital de altitudes que esteja num referencial diferente de qualquer grandeza como, por exemplo, das anomalias da gravidade.

5. Resultados

Primeiramente foram obtidas através do site do IBGE todas as altitudes vinculadas ao SGB num total de 799 (figura 1). As altitudes referidas ao DTM2006.0 foram obtidas do sítio do ICGEM (International Center for Global Earth Models). Posteriormente, foram efetuadas grades utilizando interpolador krigagem em ambos dados (figura 2 e 3).

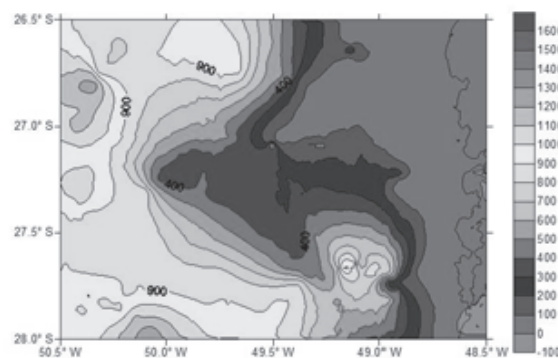


Figura 2: Dados em formato de grid de Altitudes referidas ao DTM2006.0. Observações em metros.

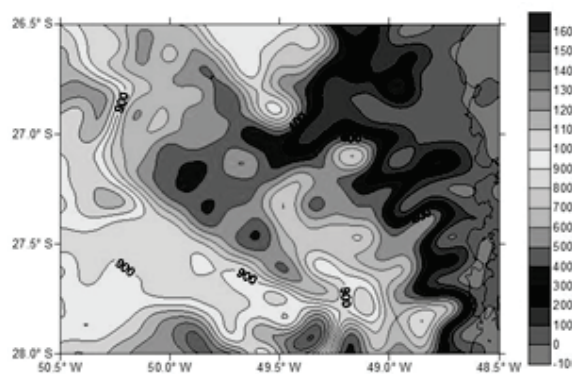


Figura 3: Dados em formação de grid de altitudes referidas ao SGB. Observações em metros.

A partir desses dados foi desenvolvido um aplicativo em ambiente MATLABM por aproximação linear a partir da equação (2) para o cálculo da correção do terreno do DTM2006.0 (Figura 4) e do SGB (Figura 5).

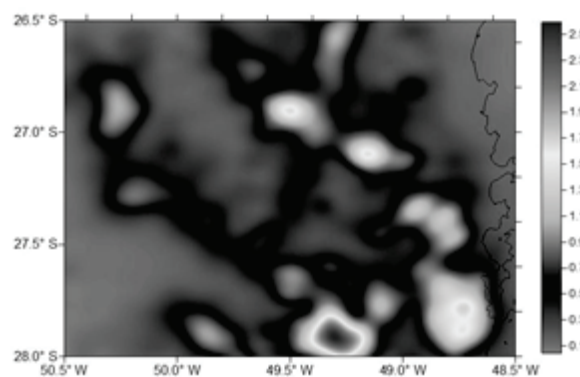


Figura 4: Correção do terreno por aproximação linear calculado com dados do DTM2006.0. Dados em mGal.

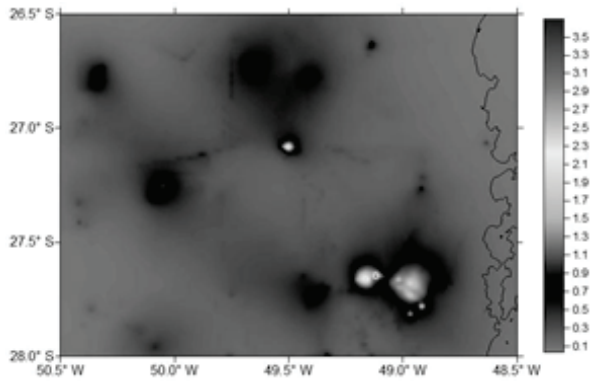


Figura 5: Correção do terreno por aproximação linear calculado com dados do SGB. Dados em mGal.

A diferença entre grids da correção do terreno calculada com dados do DTM2006.0 e a correção do terreno calculado com dados do SGB (Tabela 1) resultou em um desvio médio de 0,36 mGal e rms 0,56 mGal.

Mínimo	0,05mGal
Desvio médio	0,36mGal
Máximo	2,59 mGal
Desvio padrão	0,33 mGal
rms	0,56 mGal

Tabela 01: Resultado da diferença entre grids das correções do terreno com dados do DTM2006.0 e SGB (dados em mGal).

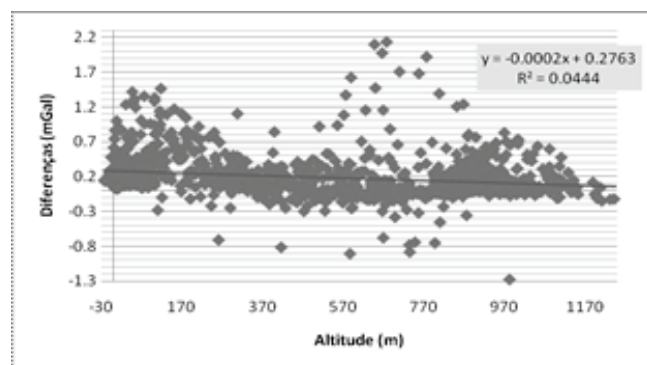


Gráfico 1: Diferenças entre as correções do terreno calculado com dados do SGB e calculado com dados do DTM2006.0 associado com as alturas geoidais.

Para obter-se a diferença devido a aproximação de um modelo digital de altitudes que esteja num referencial diferente foi desenvolvido um aplicativo (em ambiente MATLABM) utilizando a equação (6) para o cálculo das anomalias de altura.

Primeiramente foi utilizada a diferença entre os grids da correção de terreno com dados do SGB e correção de terreno com dados do DTM2006.0:

$$(g_{1-SGB} - g_{1-DTM2006}) \quad (7)$$

Após o cálculo da diferença de grids foi utilizado a equação (6) e implementado no aplicativo para o cálculo das anomalias.

Foi encontrado como resultado o valor mínimo de -10×10^{-5} m e máximo de -10×10^{-4} m.

6. Conclusões

A magnitude das discrepâncias devido as incompatibilidades de Datum verificada neste artigo foi de até -10×10^{-5} m o que pode causar diferenças de até 2,6 mGal nas anomalias de altura verificando a influência de se usar diferentes MDEs no cálculo do geóide, com referenciais distintos. No caso aqui apresentado, utilizou-se o cálculo das anomalias de altura, obtidas a partir da fórmula de Molodenskii, bem como, modelos digitais de altitudes, que estão em referenciais diferentes, como é o caso do DTM2006.0, em referencial global e os dados do SGB, em referencial local.

Referências Bibliográficas

HECK, B., SEITZ, K. A. Comparison of the Tesseroid, Prism and Point-Mass approaches for mass reductions in gravity field modeling. **J. Geodesy**, 81, 2007. p.121-136.

HOFMANN-WELLENHOF, B; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. Bad Vöslau: SpringerWienNewYork, 2005.

IBGE. **Sistema Geodésico Brasileiro: rede altimétrica**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetrica.shtm>>. Acesso: 19 de março 2010.

ICGEM – INTERNATIONAL CENTER FOR GLOBAL EARTH MODELS. <<http://www.icgem.gfz-potsdam.de/icgem/icgem.html>>. Acesso: 15 de março de 2010.

MORITZ, H. **Advanced Physical Geodesy**. Karlsruhe: Wichmann, 1980.

PAVLIS N.K, FACTOR, J.K, HOLMES, S.A, (2007). Terrain-Related Gravimetric Quantities Computed for the Next EGM In: **Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service**, vol. 18. Harita Dergisi, Istanbul, pp 318-323.

PAVLIS N.K, HOLMES, S.A, KENYON, S.C, FACTOR J.K (2006). Towards the next EGM: Progress in model development and evaluation. In A. Kılıçoğlu R. Forsberg (eds.): Gravity Field of the Earth, **Proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service (IGFS)**, 28 August – 1 September, 2006, Istanbul, Turkey (accepted).