

MODELO GEOPOTENCIAL EGM2008. TESTES REALIZADOS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

IRIS PEREIRA ESCOBAR

Observatório Nacional – ON
Coordenação de Geofísica – COGE

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ
Departamento de Engenharia Cartográfica – CARTO

Rio de Janeiro – RJ
iris@on.br

RESUMO – No contexto dos Modelos Geopotenciais Globais, analisa-se o modelo EGM2008, recém disponibilizado pelo "U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)". O modelo é testado em confronto com dados provenientes de levantamentos terrestres gravimétricos, altimétricos e GPS existentes no Estado do Rio de Janeiro, tomado como área de estudo. Estes dados possibilitaram calcular anomalias da gravidade e alturas geoidais nesta área. Usando o EGM2008 as anomalias da gravidade foram também calculadas e comparadas com aquelas determinadas na superfície física. De modo análogo, as alturas geoidais calculadas a partir do modelo foram comparadas com os respectivos valores determinados na superfície física. Os resultados são apresentados e analisados neste trabalho.

ABSTRACT – The EGM2008, just released by U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) is analysed in the context of Global Geopotential Models. The model is tested against gravimetry, altimetry and GPS ground surveys data, that exist in Rio de Janeiro State, taken as the study area. These data make possible to compute gravity anomalies and geoid heights in this area. Gravity anomalies were also derived from EGM2008 and compared with those determined on the physical surface. In a similar way, geoid heights derived from the model were compared with respective values determined on physical surface. The results are presented and analysed in this work.

1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 1960, é reconhecida a grande contribuição do rastreamento de satélites artificiais a partir de bases terrestres na determinação das componentes de grandes comprimentos de onda do campo da gravidade terrestre em escala global. Como produto desta técnica, os modelos geopotenciais globais ("GGMs – Global Geopotential Models") geralmente são disponibilizados como coeficientes de uma expansão em série de harmônicos esféricos, truncada em um determinado grau, que pode ser usada para calcular o campo gravitacional externo. A resolução espacial máxima (metade do comprimento de onda mínimo) do GGM (em km) na superfície da Terra é obtida pela divisão de 19.980 km pelo grau completo máximo da expansão em harmônicos esférico.

É comum enquadrar-se um GGM em uma das três classes seguintes (Featherstone, 2002):

1. **GGM somente satélite**, calculado apenas a partir do rastreamento de satélites artificiais da Terra;
2. **GGM combinado**, calculado a partir da combinação de um modelo somente satélite, gravimetria terrestre, altimetria por satélite – informações de gravidade calculadas em áreas marinhas, e (mais recentemente) gravimetria aérea;

3. **GGM com cauda**, calculado a partir do refinamento de um GGM existente (satélite ou combinado) usando informações de gravidade de mais alta resolução que não foram usadas previamente.

Uma nova era na determinação do campo da gravidade, teve início com as missões espaciais dedicadas ao estudo do campo da gravidade por satélites. Uma nova geração de GGMs surgiu, constituindo uma importante base para o aprimoramento da modelagem do geóide regional, baseada na técnica "remove-compute-restore" (Santos e Escobar, 2004; Santos, 1997)

O quadro 1 relaciona alguns dos GGMs combinados mais recentes.

Quadro 1 – Modelos Geopotenciais Combinados Recentes

Modelo	Ano	Grau	Citação
EGM2008	2008	2159	Pavlis et al, 2008
EIGEN-GL04C	2006	360	Förste et al, 2007
EIGEN-CG01C	2004	360	Reigber et al, 2004
PGM2000A	2000	360	Pavlis et al, 2000
EGM96	1996	360	Lemoine et al, 1998
OSU91A	1991	360	Rapp et al, 1991

O "U.S. National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)" disponibilizou o modelo EGM2008 em abril/2008. Trata-se do GGM mais recente e completo até o grau e ordem 2159. Em relação aos anteriores, o envolvimento de termos de mais alto grau confere a este modelo maior capacidade de traduzir as variações do campo gravitacional de menores comprimentos de onda, associadas a menores concentrações de massas anômalas, ou seja espera-se que o EGM2008 tenha uma resolução espacial maior do que os modelos anteriores.

Neste trabalho será apresentado o teste realizado com o EGM2008 no território do estado do Rio de Janeiro, onde são comparados os valores de anomalia da gravidade e alturas geoidais, calculados a partir dos coeficientes do modelo, com valores obtidos por observações realizadas na superfície física da Terra. Também serão comparados valores obtidos para o EGM96.

2. MISSÕES ESPACIAIS DEDICADAS AO ESTUDO DO CAMPO DA GRAVIDADE POR SATÉLITE

As missões espaciais dedicadas ao estudo do campo da gravidade observam direta ou indiretamente os gradientes gravitacionais externos da Terra através de medidas diferenciais entre dois ou mais pontos, eliminando assim erros correlacionados. Dentro deste propósito duas abordagens são encontradas (Rummel et al., 2002):

1. Rastreamento satélite-satélite ("SST – satellite-to-satellite tracking");
2. Gradiômetro da gravidade a bordo do satélite.

Os métodos SST podem usar tanto o rastreamento inter-satélites baixo-baixo ("ll-SST - low-low satellite-to-satellite tracking"), onde satélites de órbitas baixas rasteiam-se mutuamente (Cheng, 2002), ou o rastreamento inter-satélites alto-baixo (hl-SST - high-low satellite-to-satellite tracking"), onde satélites de órbitas altas (principalmente GPS) rastreiam satélite(s) de órbita baixa (Visser e van den IJssel, 2000).

O quadro 2 apresenta algumas informações resumidas sobre três missões dedicadas ao estudo do campo da gravidade por satélites: CHAMP, GRACE e GOCE.

Quadro 2 – Missões CHAMP, GRACE e GOCE

MISSÃO	ELEMENTOS DA ÓRBITA	LANÇAMENTO
CHAMP "CHALLENGING Mini-satellite Payload"	Aproximadamente circular, Altitude: ~454 km, Inclinação: ~87°	15/07/2000
GRACE ("Gravity Recovery And Climate Experiment")	Dois satélites na mesma órbita Distância: ~170-270 km, Altitude: ~480 km, Inclinação: ~89°	17/03/2002
GOCE ("Global Ocean Circulation Experiment")	Aproximadamente solar-síncrona, Altitude: ~260 km, Inclinação: 96,5°	previsto 09/2008

A missão CHAMP é conduzida pelos alemães e utiliza o conceito de rastreamento satélite-satélite no modo alto-baixo. A órbita do satélite CHAMP (baixo) é aproximadamente circular com altitude de ~454 km e inclinação de ~87° em relação ao plano equatorial. Utiliza como satélites altos a constelação GPS com órbitas de altitudes ~20.200 km, referidas a uma rede de estações de terra (International GPS Service network).

A GRACE é uma missão conjunta EUA-Alemanha, sucessora da CHAMP, que utiliza dois satélites idênticos aos tipo CHAMP, um seguindo ao outro aproximadamente na mesma órbita, separados por uma distância de ~170-270 km.

A missão GRACE utiliza o conceito de rastreamento satélite-satélite no modo baixo-baixo combinado com rastreamento satélite-satélite alto-baixo.

O rastreamento inter-satélites baixo-baixo (ll-SST) é medido usando conexões por micro-ondas, acoplado por rastreamento inter-satélites alto-baixo (hl-SST) baseado no rastreamento GPS dos dois satélites.

A missão GOCE é conduzida pela Agência Espacial Européia ("ESA - European Space Agency"), o lançamento do satélite está previsto para setembro/2008 e a sua duração estimada é de ~20 meses.

Os objetivos da missão GOCE são bem mais ambiciosos do que os das missões anteriores:

- determinar anomalias da gravidade com uma exatidão de 1 mGal ($1\text{mGal}=10^{-5}\text{ms}^{-2}$);
- determinar o geóide com uma exatidão de 1 a 2 cm;
- alcançar os objetivos anteriores com resolução espacial de 100 km.

A missão GOCE adota um conceito de rastreamento satélite-satélite alto-baixo (hl-SST) baseado no rastreamento GPS/GLONASS. A órbita do satélite é aproximadamente solar-síncrona, com 96,5° de inclinação e ~260 km de altitude.

O satélite GOCE acomoda um gradiômetro gravitacional triaxial eletrostático (figura 1), que contém três pares de massas de prova posicionados nas

extremidades de três braços ortogonais de 50 cm de comprimento. Em virtude de suas diferentes posições no campo gravitacional, elas experimentam a aceleração gravitacional da Terra de modo levemente diferente. Os três eixos do gradiômetro permitem medidas simultâneas de seis componentes independentes, mas complementares, do campo gravitacional.

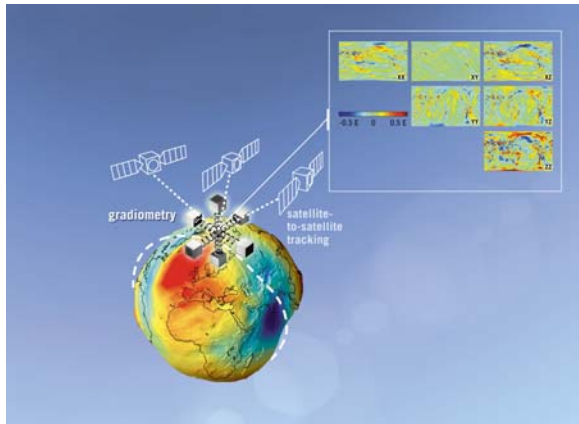


Figura 1 – Missão GOCE. Gradiômetro da gravidade

Os métodos SST são melhores na solução das componentes de frequência muito baixas do campo da gravidade global, enquanto que os gradiômetros de órbitas baixas são melhores na solução das frequências médias do campo da gravidade.

3. CÁLCULO DAS ALTURAS GEOIDAIS E DAS ANOMALIAS DA GRAVIDADE

A partir dos coeficientes dos harmônicos esféricos plenamente normalizados δC_{nm} e S_{nm} , disponibilizados por um GGM, as equações 1 e 2 possibilitam, respectivamente, os cálculos da altura geoidal N e da anomalia da gravidade Δg . Naquelas equações, (r, θ, λ) são as coordenadas esféricas polares geocêntricas do ponto desejado; P_{nm} são as funções associadas de Legendre plenamente normalizadas de grau n e ordem m . GM é a constante gravitacional geocêntrica e γ é a gravidade normal na superfície do elipsóide de referência.

$$N = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=2}^L \sum_{m=0}^n (\delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (1)$$

$$\Delta g = \frac{GM}{r^2} \sum_{n=2}^L (n-1) \sum_{m=0}^n (\delta \bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\cos \theta) \quad (2)$$

Neste trabalho os cálculos foram efetuados com uma versão adaptada do programa GRAVT-GM, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Geomática da Universidade de Calgary, Alberta, Canadá (Li, 1994).

As figuras 2 a 5 apresentam os mapas das anomalias da gravidade e das alturas geoidais calculados com as equações 1 e 2, referidos ao sistema geodésico

SIRGAS2000. A figura 2 mostra a anomalia calculada em relação ao modelo EGM2008, estendido até o grau e ordem 2159, enquanto que a figura 3 mostra a anomalia calculada em relação ao modelo EGM96, estendido até o grau e ordem 360. Percebe-se que as anomalias de menores comprimentos de onda estão mais bem definidas pelo modelo EGM2008.

Quando se compara as figuras 4 e 5, que apresentam as alturas geoidais relacionadas a estes dois modelos, novamente o EGM2008 define melhor as variações de menor comprimento de onda das alturas geoidais.

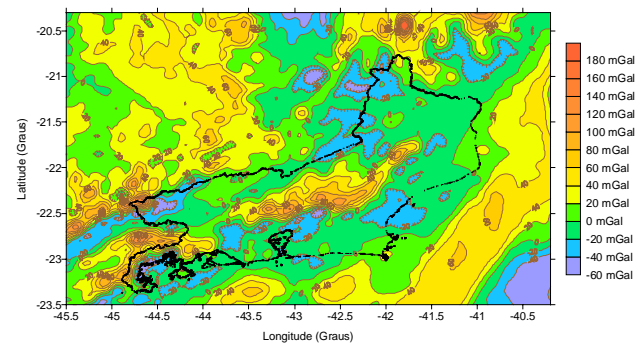


Figura 2 – Mapa da Anomalia da Gravidade Modelada no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM2008

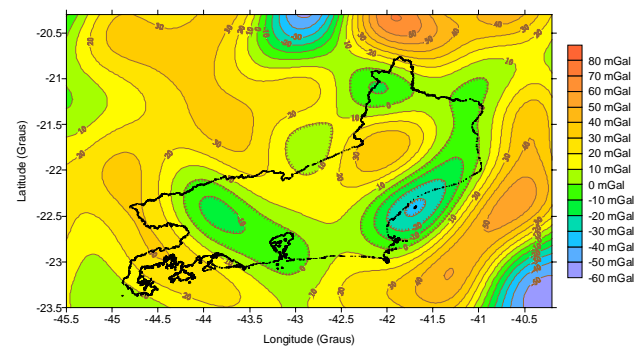


Figura 3 – Mapa da Anomalia da Gravidade Modelada no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM96

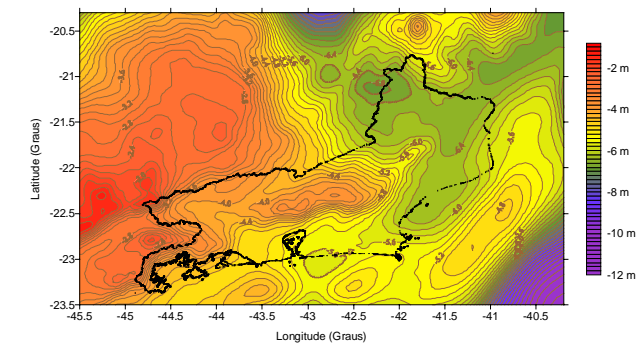


Figura 4 – Mapa da Altura Geoidal Modelada no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM2008

Como os graus máximos utilizados nos desenvolvimentos dos modelos em comparação foram

diferentes, com vantagem para o modelo EGM2008, é necessário verificar se as variações de menores comprimentos de onda apresentadas por este modelo são reais, ou surgiram artificialmente como resultado do processamento matemático. Para fazer esta verificação, os resultados dos processamentos relativos a cada um dos modelos em estudo foram comparados com valores das mesmas grandezas determinadas na superfície física.

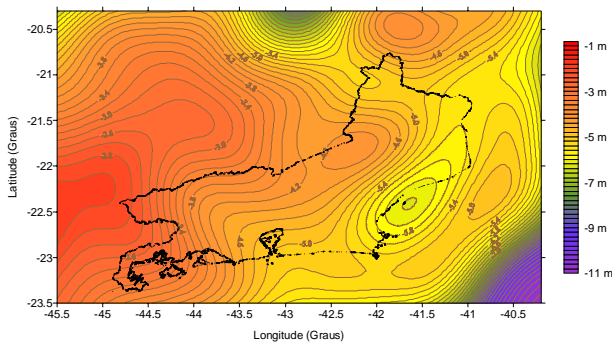


Figura 5 – Mapa da Altura Geoidal Modelada no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM96

4. TESTES DOS MODELOS EGM2008 E EGM96

Para testar os resultados das anomalias da gravidade calculadas a partir dos dois Modelos Geopotenciais em estudo, na área do Estado do Rio de Janeiro, foram utilizados 2275 pontos gravimétricos terrestres distribuídos no Estado e áreas vizinhas, com espaçamento aproximadamente regular. Estes pontos gravimétricos foram levantados pelo Observatório Nacional, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, com exatidão melhor do que 0.1 mGal.

Em cada ponto foi calculada a anomalia Bouguer referida ao sistema geodésico GRS80, que deu origem a uma grade de 3' x 3', com 107 colunas e 65 linhas, obtida com o uso do aplicativo SURFER 8.0, por interpolação a partir dos pontos de observação, usando o método de Kriging.

Para a obtenção da anomalia de Ar Livre, utilizou-se a grade Bouguer combinada com a grade altimétrica de igual distribuição de pontos, extraída do modelo digital do terreno de 3" por 3", disponibilizado pela missão espacial norte-americana SRTM. O mapa de anomalia de Ar Livre assim obtido é apresentado na figura 6.

Observa-se o mapa de anomalia de Ar Livre assemelha-se bem mais com o da figura 2, anomalia derivada do modelo EGM2008, do que com o da figura 3, anomalia derivada do modelo EGM96. Este fato, por si só, indica um aprimoramento do modelo EGM2008 em relação ao EGM96. Entretanto, é necessário comparar as discrepâncias de cada modelo em relação aos dados terrestres. Estas discrepâncias estão apresentadas na figura 7, relativas ao EGM2008, e na figura 8, relativas ao EGM96.

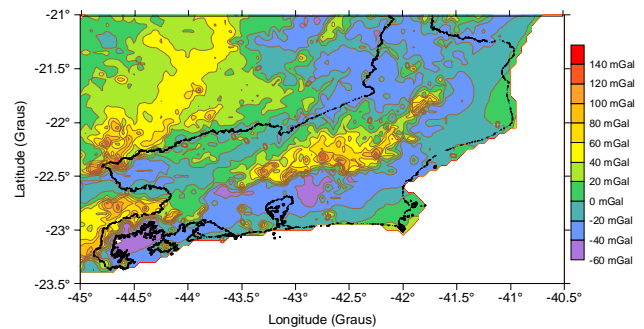


Figura 6 – Mapa de Anomalia de Ar Livre no Estado do Rio de Janeiro. Observações na Superfície Física da Terra.

As discrepâncias representadas na figura 8 aparentam maior correlação com o relevo do que aquelas representadas na figura 7. Isto mostra que realmente o modelo EGM2008 incorporou mais os efeitos gravitacionais devidos ao relevo do que o modelo EGM96. As discrepâncias estão distribuídas de maneira mais dispersa na figura 7 do que na figura 8, onde o efeito sistemático da atração gravitacional do relevo se faz presente de forma mais notória. Além disso, a magnitude das discrepâncias na anomalia da gravidade obtidas com o modelo EGM2008 é cerca da metade daquela encontrada com a aplicação do modelo EGM96.

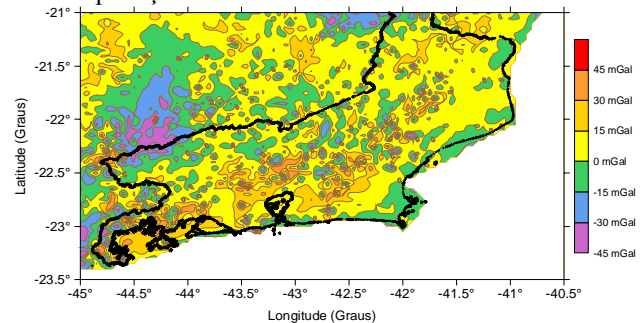


Figura 7 – Diferença de Anomalia de Ar Livre Modelada-Superficial no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM2008.

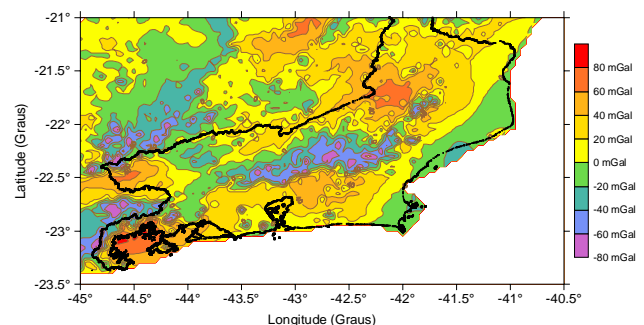


Figura 8 – Diferença de Anomalia de Ar Livre Modelada-Superficial no Estado do Rio de Janeiro. Modelo Geopotencial: EGM96.

Finalmente, uma análise estatística da distribuição das discrepâncias constatadas no uso dos dois modelos em estudo revelou que, para o modelo EGM2008, a discrepância média foi de -1,4 mGal com desvio padrão de 14, 5 mGal. Enquanto que, para o modelo EGM96, a

média das discrepâncias ficou em 1,7 mGal com desvio padrão de 26,9 mGal.

Portanto, quanto ao cálculo do valor da anomalia da gravidade, o modelo EGM2008 apresenta um real aprimoramento em relação ao modelo EGM96, reduzindo as discrepâncias em relação aos valores de anomalia determinados no terreno a praticamente a metade, com melhor estimativa de precisão. Além disso, a resolução do modelo EGM2008 também é maior, retratando melhor o efeito gravitacional do relevo.

Para verificar os resultados dos dois modelos quando aplicados ao cálculo das alturas geoidais, foram utilizadas 38 RRNN do IBGE com posicionamento GPS geodésico, situados no Estado do Rio de Janeiro. Nestes 38 pontos foram calculadas as alturas geoidais a partir das altitudes ortométricas (obtidas por nivelamento geométrico) e das altitudes Geométricas (obtidas com o uso do GPS). As alturas geoidais, assim obtidas, foram comparadas com aquelas calculadas com os dois modelos geopotenciais. Para o modelo EGM2008 foi encontrada a discrepância média de 40 cm, com desvio padrão de 28 cm, e para o modelo EGM96 encontrou-se a discrepância média de 90 cm, com 42 cm de desvio padrão. Em ambos os casos não houve discrepâncias maiores do que três vezes o desvio padrão.

Analogamente ao que foi verificado no teste das anomalias, o teste das alturas geoidais também aponta para um aprimoramento significativo quando se usa o modelo EGM2008.

5. CONCLUSÕES

O advento dos Modelos Geopotenciais Globais marcou uma nova era na Geodésia. A divulgação em abril/2008 do EGM2008, desenvolvido até grau e ordem 2159, marcou um novo estágio dentro desta nova era. Existe uma grande expectativa dos especialistas quanto ao sucesso da missão espacial GOCE, com lançamento previsto para setembro/2008, que poderá representar um novo salto de qualidade na determinação do campo da gravidade da Terra, com reflexos em várias ciências, particularmente na Geodésia.

Confrontado com dados de superfície no Estado do Rio de Janeiro o EGM2008 proporcionou valores de anomalia da gravidade com precisão estimada de 14,5 mGal e valores de altura geoidal com precisão estimada de 28 cm, removida a influência local. Face à qualidade dos levantamentos gravimétrico e altimétrico utilizados, o resultado para a anomalia da gravidade pode ser considerado mais confiável do que o que se obteve em relação à altura geoidal. Embora este possa dar uma idéia do comportamento do modelo na região estudada, carece de ampliação na quantidade de pontos de teste utilizados, bem como de um levantamento GPS rigoroso, especificamente planejado com este fim.

Comparados com os resultados do mesmo teste efetuado com o modelo EGM96, verifica-se que o EGM2008 evidencia um significativo aprimoramento, reduzindo, a cerca da metade, as discrepâncias em relação

aos valores determinados na superfície, tanto para a anomalia da gravidade como para a altura geoidal. Além disso, observa-se um relevante aprimoramento na resolução espacial do campo gravitacional determinado pelo EGM2008, que abre caminho para o seu emprego nos estudos regionais do campo da gravidade.

É importante ressaltar que, não obstante os avanços alcançados no desenvolvimento dos GGMs, ainda não se pode prescindir das observações gravimétricas de superfície que, além de contribuir para o aprimoramento dos próprios modelos, são fundamentais para a definição dos efeitos das pequenas massas anômalas que definem as feições de menores comprimentos de onda do campo da gravidade terrestre. Neste sentido os aprimoramentos dos GGMs viabilizam cada vez mais a gravimetria como método de estudo Geodésico e Geofísico e potencializam a demanda sobre as observações gravimétricas de superfície.

REFERÊNCIAS

CHENG, M.K. Gravitational perturbation theory for inter-satellite tracking, **Journal of Geodesy**, 76: 169-185, 2002.

FEATHERSTONE W. E. Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia. **Journal of Geospatial Engineering**, Vol. 4, No. 1, pp.1-19, 2002.

FÖRSTE, C., SCHMIDT, R., STUBENVOLL, R., FLECHTNER, F., MEYER, U., KÍ½NIG, R., NEUMAYER, H., BIANCALE, R., LEMOINE, J.-M., BRUINSMA, S., LOYER, S., BARTHELMES, F., AND ESSELBORN, S. The GeoForschungsZentrum Potsdam/Groupe de Recherche de Geodesie Spatiale satellite-only and combined gravity field models: EIGEN-GL04S1 and EIGEN-GL04C. **Journal of Geodesy**, doi:10.1007/s00190-007-0183-8, 2007.

LEMOINE, F.G., KENYON, S.C., FACTOR, J.K., TRIMMER, R.G., PAVLIS, N.K., CHINN, D.S., COX, C.M., KLOSKO, S.M., LUTHCKE, S.B., TORRENCE, M.H., WANG, Y.M., WILLIAMSON, R.G., PAVLIS, E.C., RAPP, R.H. AND OLSON, T.R. **The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) geopotential model EGM96**, NASA/TP-1998-206861, National Aeronautics and Space Administration, Maryland, USA, 575 pp, 1998.

LI, YECAL. **GRAVT-GM**, programa desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Geomática da Universidade de Calgary, Alberta, Canadá, 1994.

PAVLIS, N.K., S.A. HOLMES, S.C. KENYON, AND J.K. FACTOR, **An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008**, presented at the 2008 General

Assembly of the European Geosciences Union, Vienna, Austria, April 13-18, 2008.

PAVLIS, N.K., CHINN, D.S., COX, C.M. AND LEMOINE, F.G. **Geopotential model improvement using POCM_4B dynamic ocean topography information: PGM2000A**, paper presented at the Joint TOPEX/Poseidon and Jason-1 Science Working Team Meeting, Miami, USA, 2000.

RAPP, R.H., WANG, Y.M. AND PAVLIS, N.K. **The Ohio State 1991 geopotential and sea surface topography harmonic coefficient models**, Report 410, Department of Geodetic Science and Surveying, Ohio State University, Columbus, USA, 1991.

REIGBER CH., SCHWINTZER P., STUBENVOLL R., SCHMIDT R., FLECHTNER F., MEYER U., KÖNIG R., NEUMAYER H., FÖRSTE CH., BARTHELMES F., ZHU S.Y., BALMINO G., BIANCALE R., LEMOINE J.-M., MEIXNER H., RAIMONDO J.C. **A High Resolution Global Gravity Field Model Combining CHAMP and GRACE Satellite Mission and Surface**

Gravity Data: EIGEN-CG01C, GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), Dept. 1 Geodesy and Remote Sensing, Potsdam, Germany, 2004.

RUMMEL, R., BALMINO, G., JOHNNANNESSEN, J., VISSER, P. AND WOODWORTH, P. Dedicated gravity field missions - principles and aims. **Journal of Geodynamics**, 33: 3-20, 2002.

SANTOS, N. P., **Determinação gravimétrica das ondulações geoidais na região do município do Rio de Janeiro**, Dissertação de Mestrado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 110p., 1997.

SANTOS, N. P.; ESCOBAR, I. P., Discrete evaluation of Stoke's integral by means of Voronoi and Delaunay structures, **Journal of Geodesy**, 78, pp. 354-367, 2004.

VISSER, P.N.A.M., VAN DEN IJSSEL, J. GPS-based precise orbit determination of the very low Earth orbiting gravity mission GOCE, **Journal of Geodesy**, 74: 590-602, 2000.