

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DO CAMPO DA GRAVIDADE TERRESTRE ADVINDOS DA MISSÃO GOCE - GRAVITY FIELD AND STEADY-STATE OCEAN CIRCULATION EXPLORER

KAROLINE PAES JAMUR
LINEARDO MELO
SILVIO ROGÉRIO CORREIA DE FREITAS

Universidade Federal do Paraná
Setor de Ciências da Terra
Departamento de Geomática, Curitiba - PR
{karol.mestrado, sfreitas}@ufpr.br; lineardo@hotmail.com

RESUMO

Apresenta-se neste trabalho um estudo sobre o comportamento dos modelos GO_CONS_GCF_2_DIR, GO_CONS_GCF_2_TIM, GO_CONS_GCF_2_SPW, obtidos de dados “satélite-somente” da missão “*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*” (GOCE) juntamente com os modelos mais recentes das missões “*Gravity Recovery And Climate Experiment*” (GRACE), o GGM03s e ITG-GRACE2010s e GOCO01S (GOCE e GRACE). O modelo EIGEN51c que combina dados terrestres, GRACE e “*CHALLENGING Minisatellite Payload*” (CHAMP) e o modelo geoidal brasileiro MAPGEO2010 também são avaliados. São utilizados para a avaliação dados de observações GPS sobre marcos de referência (RN's) em uma região de estudo compreendida entre os paralelos 22°S e 27°S, e os meridianos 48°W e 55°W que envolve todo o Estado do Paraná.

INTRODUÇÃO

A missão GOCE (FIGURA 01) foi lançada dia 17 de março de 2009, utiliza uma combinação das técnicas SST (*Satellite-to-satellite tracking*) e gradiometria, sendo assim, a recuperação do campo de gravidade a partir do espaço, não é baseada puramente nas perturbações de órbita. As irregularidades da órbita podem ser convertidas em médio e longo comprimento de onda do campo de gravidade, enquanto a gradiometria fornece um mapeamento do campo de gravidade em médio e curto comprimento de onda.

O satélite tem uma órbita inicial de aproximadamente 250 km, que é permanentemente mantida por propulsores iônicos, para melhor monitorar os sinais de gravidade. A inclinação de 96,5°.

O satélite de GOCE é monitorado pelo sistema de posicionamento global GPS (e eventualmente também pelo sistema GLONASS), que irá fornecer a órbita com uma precisão na faixa do centímetro. O gradiômetro de três eixos com seis acelerômetros localiza-se a bordo do satélite e tem como objetivo fornecer informações do campo da gravidade local em termos de derivadas de segunda ordem do potencial gravitacional ao longo da órbita, além de acelerações lineares e angulares do satélite que será compensada por propulsores já que o satélite tem movimento contínuo de queda livre (ESA, 2010).

FIGURA 01 - DESENHO ARTÍSTICO DA MISSÃO GOCE

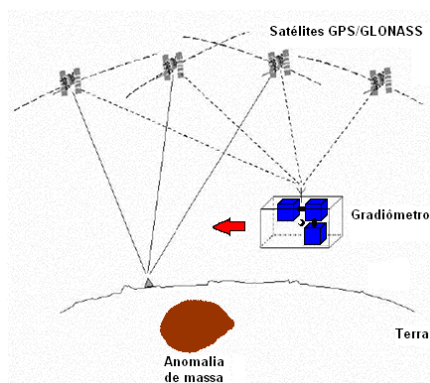


Fonte: ESA (2010).

A combinação do GPS, o rastreamento HL-SST (FIGURA 02) e acelerômetros fornecem uma ferramenta excelente para o mapeamento homogêneo do campo de gravidade da Terra a partir do espaço com maior acurácia, resolução espacial e temporal (REIGBER, SCHWINTZER, 2002).

O princípio no qual a missão GOCE se baseia é o da gradiometria por satélite, onde se mede a aceleração relativa de duas massas de teste em posições diferentes dentro do satélite. Cada massa de teste é confinada em um compartimento e levitando (flutuando sem tocar as paredes) por um mecanismo de retro-alimentação capacitivo e indutivo. A diferença nos sinais de retro-alimentação entre duas massas de teste é proporcional à sua aceleração relativa e exercida puramente pelo campo gravitacional diferencial.

FIGURA 02 - O CONCEITO DE RASTREAMENTO GOCE; HIGH-LOW INTER-SATELLITE (HL-SST) COM GPS/GLONASS E O GRADIÔMETRO.



Fonte: Adaptada de RUMMEL et al., 2002.

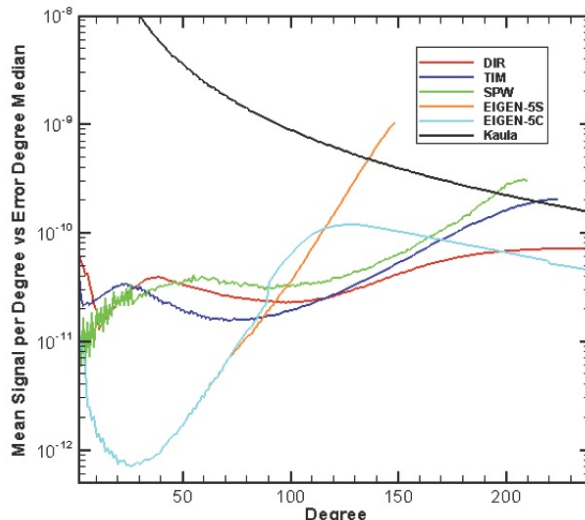
A aceleração não gravitacional da espaçonave afeta todos os acelerômetros dentro do satélite da mesma maneira e é, então, idealmente removida durante a diferenciação. O movimento rotacional do satélite afeta as diferenças medidas. Porém, o sinal rotacional (velocidades e acelerações angulares) pode ser separado do sinal gravitacional, se as diferenças de aceleração são captadas em todas as possíveis combinações espaciais. Entretanto, os resultados dela provenientes são muito afetados por massas locais. Sendo assim, a gradiometria aero-espacial apresenta-se como uma forma de reduzir grande parte dos efeitos dessas massas. Por outro lado, a medição diferencial pode contrabalançar de forma ótima a atenuação do sinal devido à altura do satélite. A missão GOCE permitirá a dedução de modelos globais e regionais do campo gravitacional (estático) da Terra, tais como cadeias de montanhas, zonas de subducção, dorsais oceânicas, hotspots, células de convecção ou topografia núcleo/manto.

Um dos produtos obtidos da missão GOCE, o geóide pode ser obtido com uma resolução de cerca de 70 km de meio comprimento de onda e com uma precisão de 1 cm em uma escala quase global. Convertido para a gravidade desta anomalia corresponde a uma precisão melhor do que um mGal (ESA, 2010).

Os novos modelos, para o campo da gravidade em todo o globo, advindos somente de satélites, são promissores para o aperfeiçoamento do conhecimento acerca dos componentes do campo de gravidade local ou global, de longo e médio comprimento de onda (>83 km). Com dois meses de GOCE, pode-se alcançar de 4-7 cm na precisão do geóide em grau e ordem 170 (resolução espacial de 120 km) em comparação com 9-10 cm dos modelos GRACE (GRÁFICO 01; GRUBER; VISSER, 2010).

Os modelos geopotenciais globais já disponíveis da missão GOCE GO_CONS_GCF_2_DIR, GO_CONS_GCF_2_SPW estão disponíveis para o potencial externo da Terra em grau e ordem 240 e 210 respectivamente; e os modelos GO_CONS_GCF_2_TIM, GOCO01S em grau e ordem 224, este último combinando também dados da missão GRACE. Com o programa, disponível no sítio do ICGEM foi possível avaliar os modelos geopotenciais em termos de alturas quase-geoidais ou anomalias de altura, para verificar o que mais se adéqua à região de estudo. Comparou-se a anomalia de altura obtida através do GPS/Nivelamento (ζ_{GPS}) com os valores dados pelos modelos (ζ_{GOCE}). A quisa de comparações, foram também utilizados os modelos mais recentes das missões “*Gravity Recovery And Climate Experiment*” (GRACE), o GGM03s e ITG-GRACE2010s e também o modelo EIGEN51c que combina dados terrestres, GRACE e “*CHallenging Minisatellite Payload*” (CHAMP). O novo modelo geoidal brasileiro MAPGEO2010 também é avaliado.

GRÁFICO 01 – ANÁLISE DE SINAL E ERRO ENTRE GOCE, GRACE. NOTA-SE SIGNIFICANTE CONTRIBUIÇÃO DE GOCE ENTRE GRAU E ORDEM 90 E 170.

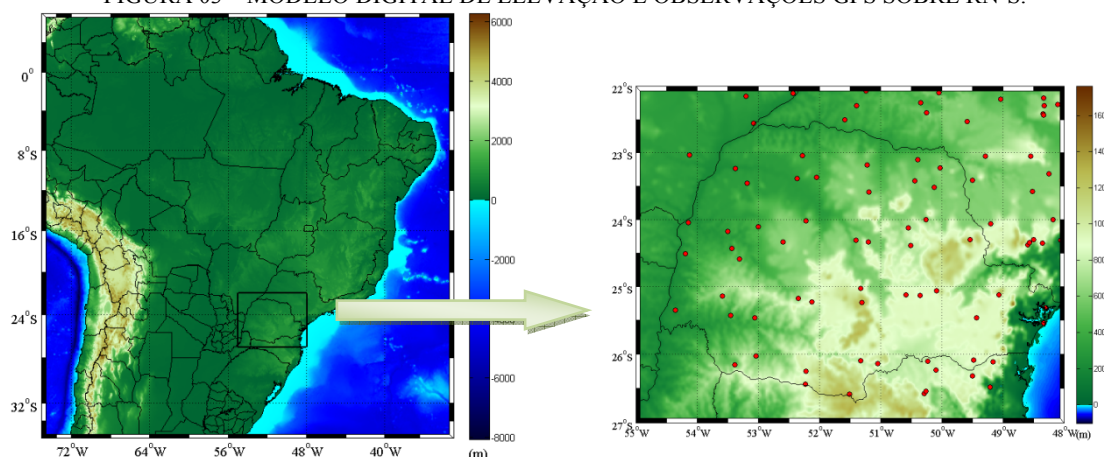


Fonte: GRUBER, VISSER (2010).

ÁREA DE TRABALHO

São utilizados para a avaliação dados de observações GPS sobre RN's em uma região de estudo compreendida entre os paralelos 22°S e 27°S, e os meridianos 48°W e 55°W que envolve todo o Estado do Paraná (FIGURA 03).

FIGURA 03 – MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO E OBSERVAÇÕES GPS SOBRE RN'S.



METODOLOGIA

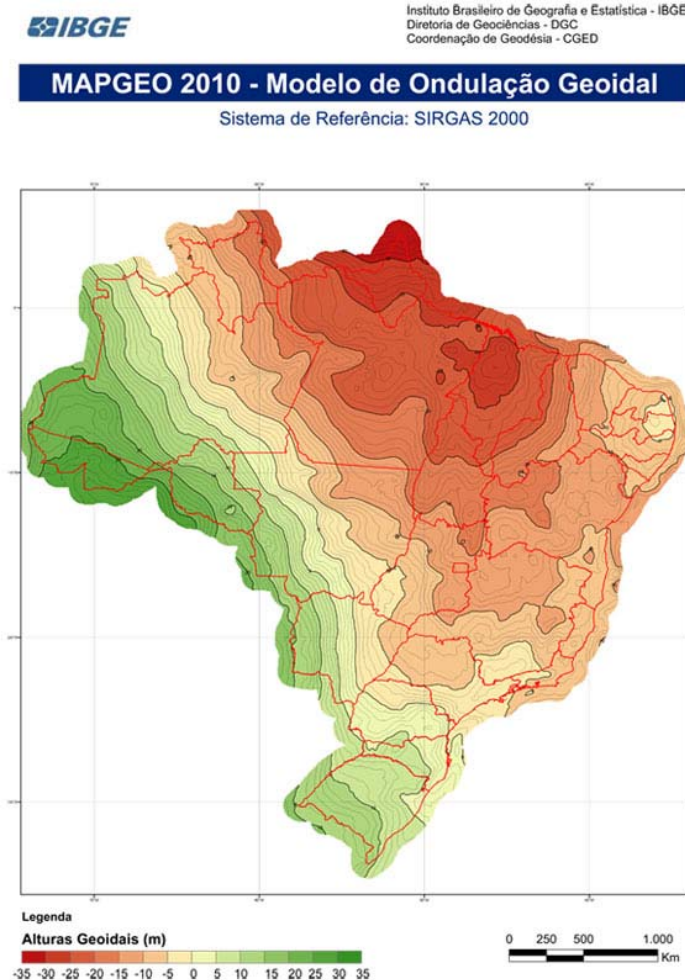
Os modelos geopotenciais foram avaliados em termos de alturas quase-geoidais ou anomalias de altura, para verificar o que mais se adéqua à região de estudo. Comparou-se a anomalia de altura obtida através do GPS/Nivelamento (ζ_{GPS}) com os valores dados pelos modelos (ζ_{GOCE}) obtidos pelo aplicativo ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html>). Também, uma comparação com o recente modelo geoidal brasileiro, MAPGEO2010 e recentes modelos GRACE e CHAMP.

As três soluções preliminares do campo da gravidade que foram calculadas a partir de 2 meses de dados da missão GOCE têm as terminações DIR, TIM e SPW que significam:

- 1) **DIR - Direct Approach:** Modelo da gravidade combinado (dados do GRACE + terrestre + altimetria); usa também, dados de órbitas dinâmicas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos.
- 2) **TIM - Time-Wise Approach:** Modelo que usa órbitas cinemáticas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos.
- 3) **SPW - Space-Wise Approach:** Modelo que utiliza um conhecimento a priori de longos comprimentos de onda e órbitas cinemáticas de GOCE e gradiometria como dados de observação definidos.

O MAPGEO2010, modelo geoidal brasileiro utilizado nesse trabalho foi concebido e produzido conjuntamente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), através da Coordenação de Geodésia (CGED), e pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – EPUSP. O modelo MAPGEO2010 foi calculado com uma resolução de 5' de arco, e o Sistema de Interpolação de Ondulações Geoidais foi atualizado. Através deste sistema, os usuários podem obter a ondulação geoidal em um ponto ou conjunto de pontos, cujas coordenadas referam-se tanto a SIRGAS2000 (FIGURA 04) quanto a SAD69 (IBGE, 2010). Os dados para a região de estudos foram obtidos a partir do aplicativo MAPGEO2010 que pode ser facilmente obtido pelo site do IBGE (IBGE, 2010).

FIGURA 04 – MODELO DE ONDULAÇÃO GEOIDAL BRASILEIRO (MAPGEO2010).



FONTE: IBGE (2010).

RESULTADOS

Foi efetuada a avaliação relativa desses modelos, utilizando alguns pontos GPS sobre RN's para validação na região de estudos. Os resultados são apresentados na TABELA 01.

TABELA 01 – ANÁLISE RELATIVA DOS MODELOS, UTILIZANDO PARA VALIDAÇÃO, DADOS GPS SOBRE RN'S.

Modelo	Dados	Grau /ordem	Erro Relativo (cm/km)
GO_CONS_GCF_2_DIR	Modelo combinado + GOCE	240	0,16
GO_CONS_GCF_2_TIM	GOCE	224	0,10
GO_CONS_GCF_2_SPW	GOCE	210	0,06
GOCO01s	GOCE+GRACE	224	0,17
ITG-GRACE2010s	GRACE	180	0,13
EIGEN 51c	GRACE+CHAMP	359	0,14

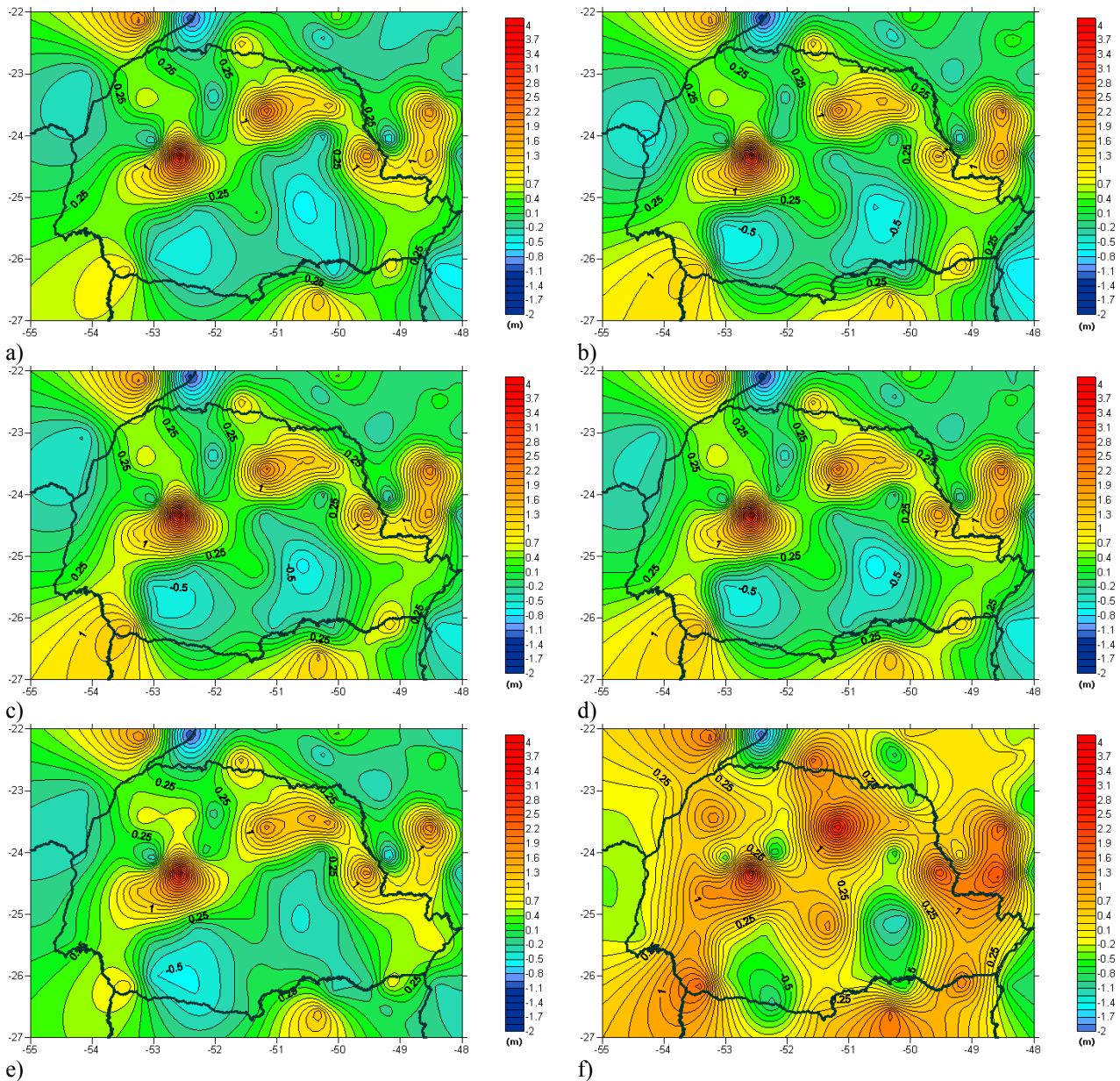
s = Modelo satélite somente; c = modelo combinado (Altimetria + Gravimetria terrestre).

A avaliação absoluta dos modelos foi feita utilizando cerca de 80 pontos GPS sobre RN's cuja distribuição pode ser verificada na figura 04. Os resultados são apresentados na TABELA 02 e FIGURA 05.

TABELA 02 – ANÁLISE ABSOLUTA DOS MODELOS, UTILIZANDO DADOS GPS SOBRE RN'S

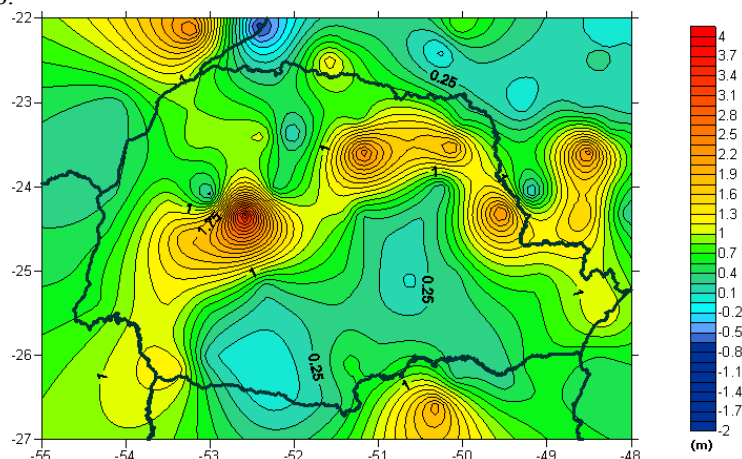
Modelo	Mínimo (m)	Máximo (m)	Desvio Médio (m)	RMS (m)
GO_CONS_GCF_2_DIR	-1,13	3,39	0,29	0,83
GO_CONS_GCF_2_TIM	-1,39	3,66	0,32	0,89
GO_CONS_GCF_2_SPW	-1,44	3,73	0,34	0,92
GOCO01s	-1,45	3,65	0,33	0,90
ITG-GRACE2010s	-2,10	2,77	0,30	0,99
EIGEN 51c	-1,16	3,27	0,27	0,77

FIGURA 05 – RECORTE DAS DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS GEOPOTENCIAIS GLOBAIS E GPS/RN'S PARA A REGIÃO DE ESTUDOS: a) GO_CONS_GCF_2_DIR; b) GO_CONS_GCF_2_SPW; c) GO_CONS_GCF_2_TIM; d) GOCO01S; e) EIGEN 51C; f) ITG-GRACE2010S.



Do mesmo modo, efetuou-se a avaliação relativa e absoluta para o MAPGEO2010 com dados GPS sobre RN's. Foi encontrado valores na análise relativa 0,11 cm/km e na absoluta, mínimo de -0,78 m, máximo de 3,68 m, desvio médio de 0,73 m e RMS de 1,04 m. O recorte com as diferenças é apresentado na FIGURA 06.

FIGURA 06 – RECORTE DAS DIFERENÇAS ENTRE MAPGEO2010 E GPS/RN'S PARA A REGIÃO DE ESTUDOS.



CONCLUSÕES

Constata-se que enquanto os modelos derivados das missões de gravimetria por satélites apresentam um desvio médio em torno de 30 cm relativamente às anomalias de altitude obtidas com GPS sobre RNs, o modelo MAPGEO2010 apresenta desvio médio de 73 cm relativamente a mesma base de dados. Este aspecto destaca uma das maiores potencialidades da gravimetria por satélites que é a da consistência de referenciais e na região de estudo mostram-se mais consistentes que o MAPGEO2010.

As novas informações advindas de GOCE constituem passos revolucionários que contribuem para a continuação dos esforços da comunidade geodésica nos últimos anos para uma alta resolução e alta precisão do modelo do campo de referência estática. Além disso, fornece uma ferramenta indispensável para apoiar novos estudos do campo da gravidade e os desenvolvimentos contínuos do Global Geodetic Observing System (GGOS).

REFERÊNCIAS

ESA, European Space Agency. Disponível em: <<http://www.esa.int/esaCP/index.html>> Acessado em 2010.

IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. MAPGEO2010 – Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm> Acessado em 01/11/2010.

JAMUR, K. P. *Estimativa da Resolução de Modelos Geoidais Globais Obtidos de Missões Satelitais e Gravimétricos Regionais Para o Estado do Paraná com Base em Observações Gravimétricas*. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 116p. 2007.

GRUBER, T. VISSER, P. ACKERMANN, C. FECHER, T. HEINZE, M. *Validation of GOCE Gravity Field Models and Precise Science Orbits*. ESA Living Planet Symposium, Bergen, 2010 .

RUMMEL, R. BALMINO, G. JOHANNESSEN, J. VISSER P. WOODWORTH P. *Dedicated gravity field missions – principles and aims*, Journal of Geodynamics, v.33, p.3-20, 2002.