



O Modelo Geoidal de Goiás – MODGEO-GO
The Geoid Model of Goiás – MODGEO-GO

Carlos Alberto Correa e Castro Júnior¹;
Gabriel do Nascimento Guimarães² & Nilson Clementino Ferreira¹

¹Universidade Federal de Goiás, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais
Av. Esperança, s/n - Chácara de Recreio Samambaia, 74690-900, Goiânia – GO, Brasil

²Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo
Rod. LMG 746, km 01, s/n, 38500-000 Monte Carmelo – MG, Brasil
E-mails: correaecastrojr@gmail.com; gabriel@ufu.br; nclferreira@gmail.com

Recebido em: 21/09/2018 Aprovado em: 23/10/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_460_469

Resumo

As limitações impostas pelos biomas brasileiros, atreladas a questões socioeconômicas, dificultaram sobremaneira a implantação de um arcabouço geodésico em parte do país. Por conta dessas circunstâncias há diversas áreas desprovidas de infraestrutura geodésica. No que tange à componente planimétrica, as opções vinculadas ao GNSS satisfazem plenamente às necessidades corriqueiras. Entretanto, quando o posicionamento vertical precisa ser determinado com exatidão, as altitudes fornecidas pelo GNSS não atendem a maior parte das aplicações triviais e demandadas pelas grandes obras da engenharia, sobretudo aquelas que envolvem fluxos d'água. Para possibilitar a obtenção de altitudes precisas e vinculadas ao campo de gravidade terrestre se faz necessário contar com um modelo geoidal, razão pela qual o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo geoidal estadual para contemplar todos os segmentos usuários que necessitam de altitudes consistentes. Para tanto, foi utilizada a integral modificada de Stokes por meio da Transformada Rápida de Fourier. A decomposição espectral foi empregada no cálculo dos modelos, sendo que a componente de longo comprimento de onda foi representada pelos modelos EIGEN-6C4, GOCO05C e GECO até grau e ordem 200 e 250. Os modelos foram comparados em termos de comparações absolutas a partir de 140 estações GNSS sobre nivelamento. Os resultados dos 3 modelos se mostraram consistentes entre si com diferença padrão em torno de 10 cm.

Palavras-chave: geoid; gravimetria; GOCE; integral de Stokes

Abstract

The limitations imposed by the Brazilian biomes, linked to socioeconomic issues, have greatly hampered the implementation of a geodetic framework in part of the country. Due to these circumstances there are several areas devoid of geodesic infrastructure, leading the user community to adopt alternative solutions, some of which are inadequate. Regarding the planimetric component, the GNSS-related options fully meet common needs. However, when vertical positioning needs to be determined accurately, the altitudes provided by the GNSS do not serve most of the trivial applications demanded by major engineering works, especially those involving water flows. To make it possible to obtain precise altitudes linked to the terrestrial gravity field, it is necessary to have a geoid model, which is why the aim of this paper was to elaborate a state geoid model to contemplate all the user segments that need consistent attitudes. For this, the modified Stokes integral was used by means of the Fast Fourier Transform. The spectral decomposition was used in the calculation of the models, and the long wavelength component was represented by the EIGEN-6C4, GOCO05C and GECO models up to degree and order 200 and 250. The models were compared in terms of absolute comparisons from 140 stations GNSS over leveling. The results of the three models were consistent with each other with a standard difference of around 10 cm.

Keywords: geoid; gravimetry; GOCE; Stokes' integral

1 Introdução

Dentre os incontáveis benefícios provenientes dos satélites artificiais à ciência geodésica, destaca-se a disponibilização de coordenadas tridimensionais: latitude (φ), longitude (λ), e altitude geodésica (h). As altitudes geodésicas, oriundas do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - Global Navigation Satellite System), são referidas a um elipsoide e possuem apenas natureza geométrica, carecendo de conotação física. Por conseguinte, é recomendável que o emprego de tais altitudes fique restrito às aplicações em que não haja envolvimento com o fluxo de água. De acordo com Guimarães (2010), é a força de gravidade que norteia o trajeto dos fluidos; desconsiderar essa premissa num sistema altimétrico pode trazer inconveniências com relação ao armazenamento e escoamento de grandes massas d'água.

Para que as altitudes geodésicas passem a ter algum sentido físico precisam estar vinculadas ao campo de gravidade terrestre. Em outras palavras, é preciso substituir a referência geométrica de tais altitudes, representada pela superfície elipsoidal, por uma referência que represente a superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra, denominada superfície geoidal. A grandeza que permite a transformação de altitudes geométricas em físicas, separando a superfície elipsoidal da geoidal, é a ondulação ou altura geoidal (N). A expressão que correlaciona essas três grandezas, é dada por $H \approx h - N$. Essa expressão, aparentemente simples, se reveste de especial importância, na medida em que permite a obtenção de H por meio de um modelo geoidal. Indica ainda, segundo Vaníček et al., (2003), que a exatidão de H depende primordialmente da precisão de N , ou seja, da precisão do modelo geoidal adotado.

As diferentes contribuições para o cálculo rigoroso de N , por meio de um modelo geoidal gravimétrico, são evidenciadas por Guimarães (2013),

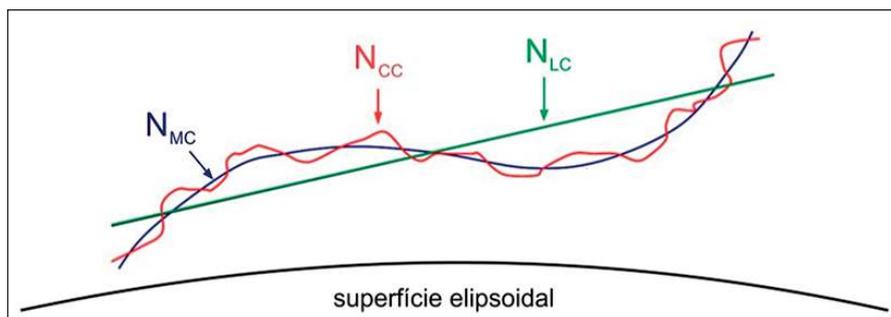
ao discorrer sobre a existência de componentes de longo, médio e curto comprimento de ondas nas ondulações geoidais. Apesar de não haver uma divisão rígida das dimensões de tais componentes, os longos comprimentos (NLC) correspondem às baixas frequências das ondulações, advêm dos Modelos Globais do Geopotencial e representam um geóide com contornos suaves; os médios comprimentos (NMC), provenientes das informações gravimétricas terrestres e oceânicas, produzem uma superfície geoidal mais irregular; os curtos comprimentos de onda (NCC) retratam as influências do relevo obtidas, por exemplo, de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e permitem maior detalhamento na representação das altas frequências das alturas geoidais. A Figura 1 expressa como essas distintas contribuições se complementam e influenciam conjuntamente nas conformações da superfície geoidal.

2 O Porquê de um Modelo Geoidal para Goiás

Em termos genéricos, um modelo geoidal pode ser traduzido por um conjunto de dados devidamente estruturados e processados, permitindo, em última análise, o cálculo de ondulações geoidais. Guimarães et al., (2015), explicam que há diversas alternativas que, independentes ou combinadas, permitem a determinação de modelos geoidais; observa-se que nem todas as alternativas consideram, necessariamente, informações gravimétricas.

A infraestrutura altimétrica oficial provida pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), representada pelas RRNN que compõem a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), possui algumas limitações, dentre as quais se evidencia o recobrimento heterogêneo no país. Goldani (2006), reforça essas premissas e acrescenta que é praticamente

Figura 1 Componentes de longo, médio e curto comprimento de ondas nas ondulações geoidais (Guimarães, 2013, modificado de Schwarz; Sideris; Forsberg, 1987)



inviável contar apenas com a RAAP para solucionar as demandas altimétricas no Brasil. Diante do exposto, evidencia-se a necessidade de um modelo geoidal para atender às necessidades dos usuários.

O MAPGEO2015 representa a quinta edição de modelo geoidal oficial nacional, elaborado por meio de esforços conjuntos envolvendo o IBGE e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (Matos et al., 2017). Em épocas distintas, os modelos da série MAPGEO foram oficialmente adotados pelo IBGE para a obtenção de N em todo território brasileiro. Entretanto, essa abrangência nacional num país de dimensões continentais, acarretou a utilização de dados gravimétricos não homogêneos, advindos de diversas instituições e obtidos segundo metodologias, equipamentos e referenciais diferentes (Lobianco, 2005). Como a formulação de Stokes requer informações que extrapolam as fronteiras brasileiras, inúmeros dados de países vizinhos também foram considerados nesses modelos nacionais, aumentando a desigualdade nas informações de gravidade. Para fazer frente às deficiências dos modelos geoidais nacionais, algumas unidades da federação buscaram o estabelecimento de modelos estaduais mais condizentes com as suas respectivas necessidades altimétricas. Silva (2002), Guimarães (2010) e (2013), ofereceram modelos geoidais para o estado de São Paulo. Goldani (2006), contemplou o Paraná. Destarte, seguindo a tendência desses estados, o objetivo deste trabalho é apresentar o modelo geoidal (MODGEO-GO) para o estado de Goiás, possibilitando à comunidade goiana auferir altitudes mais precisas e adequadas às suas reais conveniências.

2.1 Localização da Área

No intuito de se elaborar o MODGEO-GO, o primeiro passo foi definir as regiões envolvidas na modelagem (Figura 2). Por conseguinte, três áreas específicas foram consideradas no planejamento: área a ser efetivamente modelada; área de dados gravimétricos (região onde foram coletadas informações da aceleração de gravidade, representada por um retângulo com uma faixa adicional de 2° ao redor da área modelada); e, área correspondente ao modelo digital de terreno (3° de amplitude para cada lado da região efetivamente modelada).

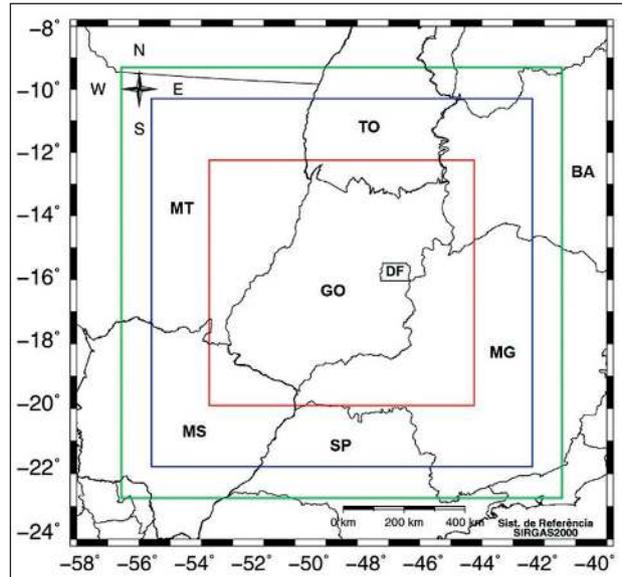


Figura 2 Áreas consideradas no MODGEO-GO: área efetivamente modelada (em vermelho), área de dados gravimétricos (azul) e área correspondente ao modelo digital de terreno (verde)

3 Material

Definidas as áreas de abrangência, as ações foram direcionadas à identificação e seleção dos dados envolvidos na construção e avaliação do MODGEO-GO. Nesse contexto, basicamente quatro conjuntos de dados foram considerados: estações gravimétricas terrestres, modelos do geopotencial global, modelos digitais do terreno e medições GNSS em RRNN.

3.1 Estações Gravimétricas Terrestres

De acordo com Goldani (2006), a indisponibilidade de dados gravimétricos apropriados aos fins geodésicos, aliada à distribuição irregular dos mesmos, constitui a principal barreira ao estabelecimento de modelos geoidais em terras brasileiras. Por conta desse quadro, torna-se fundamental a continuada realização de atividades geodésicas voltadas à determinação de Estações Gravimétricas (EEGG) em regiões carentes de tais informações.

Diante dos vazios gravimétricos existentes na região modelada, centenas de novas EEGG tiveram que ser estabelecidas a fim de proporcionar um ganho de qualidade ao MODGEO-GO. Entretanto, dada à dificuldade de se recobrir todo o território a ser modelado em apenas quatro anos, o planejamento dessa

malha gravimétrica considerou polos prioritários, onde foram contemplados, na medida do possível, os maiores vazios gravimétricos e as regiões economicamente mais ativas. Foram 4600 novas EEGG, medidas em diferentes recantos de Goiás e do Distrito Federal, com o apoio da EPUSP e do IBGE desde 2013 (Figura 3). A convergência de esforços propiciada pelas duas instituições mencionadas denota a importância desta região no cenário nacional e decorre do fato de que as novas EEGG alimentarão as futuras versões de modelos geoidais nacionais e continentais.

A localização das EEGG buscou a configuração mais homogênea possível. Para as áreas de maior conurbação foram utilizadas quadrículas de 2,5' (aproximadamente 4,5 km de lado). As demais regiões contempladas com densificação gravimétrica

atenderam ao critério considerado no cálculo do MODGEO-GO, que subdividiu todo território a ser modelado em células básicas de 5'x 5' (cerca 9 km de lado).

Adicionalmente à mensuração de g, foram empreendidas medições de φ , λ e h, em todas as EEGG. Tais coordenadas permitiram georreferenciar as estações terrestres e, adicionalmente, subsidiaram os processamentos decorrentes. Em sua grande maioria, essas coordenadas foram obtidas através de receptores GNSS de dupla frequência, adotando-se a estratégia de posicionamento relativo a partir de bases de rastreamento locais, ou então, pós-processadas pelo aplicativo online do IBGE intitulado de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Os equipamentos compartilhados em duas das estações medidas, podem ser vistos pela Figura 4.



Figura 4 Equipamentos usados nas determinações das EEGG

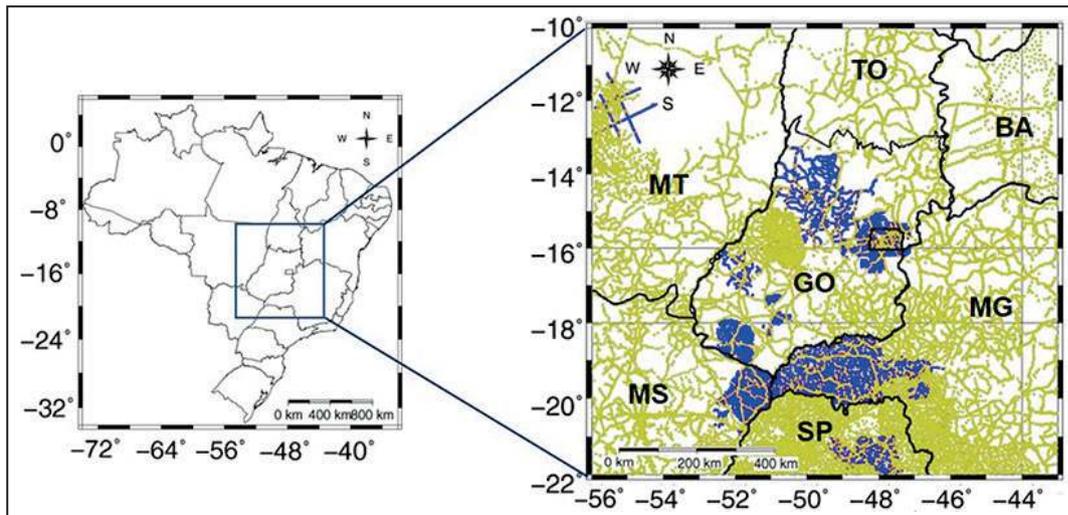


Figura 3 EEGG utilizadas no MODGEO-GO: estabelecidas antes de 2013 (em sépia) e medidas posteriormente (azul)

3.2 Modelo Global do Geopotencial

Conhecido também como Modelo Global Gravimétrico, um Modelo Global do Geopotencial (MGG) foi o segundo insumo básico que subsidiou a elaboração do MODGEO-GO. Após análises sobre a procedência e especificidades dos modelos mais recentes, foram escolhidos três MGGs para cálculo e avaliação dos resultados do MODGEO-GO: EIGEN-6C4 (Förste et al., 2015), GOCO05c (Fecher et al., 2016) e GECO (Gilardino et al., 2016).

Modelo	Ano	Grau	Informações (S Satélite; A Altimetria e G Gravimetria aérea e/ou terrestre)
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(GOCE), S(GRACE), S(LAGEOS)
GECO	2015	2190	EGM2008, S(GOCE)
GOCO05c	2016	720	A, G, S

Tabela 1 Características dos modelos do geopotencial utilizados no cálculo do MODGEO-GO

3.3 Modelo Digital do Terreno - MDT

Para o MODGEO-GO foi considerado o MDT denominado SAM3s_v2, cuja sigla representa a segunda versão do Modelo Sul Americano (SAM - South American Model), calculado para um grid de 3"x 3". A elaboração do SAM3s_v2 ficou a cargo de Matos & Blitzkow (2008) e teve como referência principal o modelo global Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Blitzkow et al., 2016). À semelhança do MAPGEO2015, a adoção do SAM3s_v2 (Figura

5) pelo MODGEO-GO atendeu aos objetivos de se calcular a correção do terreno, correção entre o geoide e o quase geoide, as anomalias de gravidade de Bouguer, anomalias ar livre média, os efeitos topográficos direto, indireto primário, indireto secundário, além dos efeitos atmosféricos direto (Matos & Blitzkow, 2009).

3.4 Medições GNSS em RRNN

Complementando o rol de insumos básicos destinados à avaliação do MODGEO-GO, houve a determinação precisa de h, por meio de observações GNSS, sobre algumas RRNN criteriosamente escolhidas. O objetivo precípua foi coletar elementos que permitissem a comparação entre as ondulações medidas diretamente, com aquelas disponibilizadas pelo modelo geoidal. Essas comparações possibilitaram a validação do MODGEO-GO.

Os rastreios efetuados nas RRNN (Figura 6) ocorreram em três seções independentes, cada uma com duração mínima de três horas e com altura diferente para o centro elétrico da antena. Após o término de cada seção, o tripé foi removido e reinstalado de tal forma que uma nova centragem da antena teve que ser procedida. Esses cuidados foram rotineiramente adotados a fim de se detectar a incidência de eventuais erros grosseiros, correlacionados à centragem e à avaliação da altura do centro elétrico da antena GNSS com relação à chapa que materializa a RN. As coordenadas geodésicas das estações rastreadas foram calculadas pelo IBGE através do software científico Bernese 5.2.

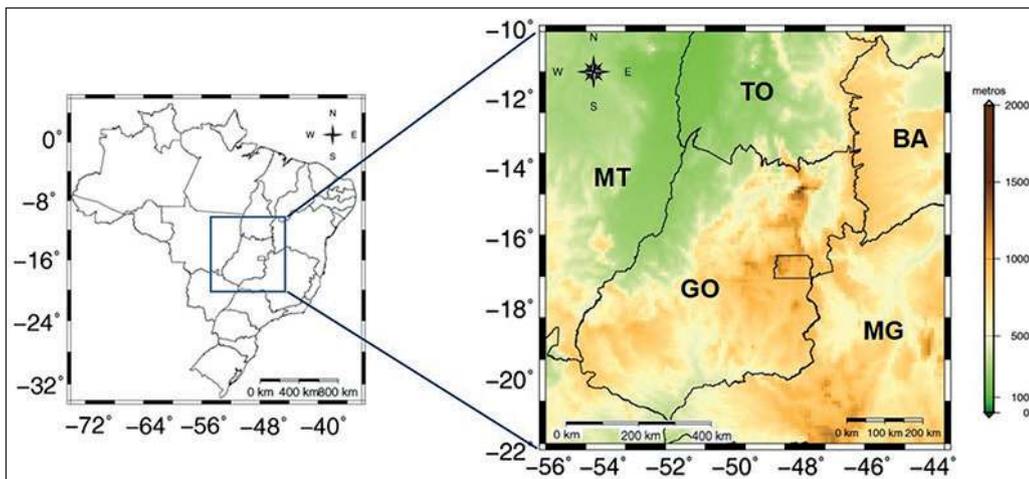


Figura 5 MDT da área de estudo



Figura 6 Medições GNSS em RRNN

4 Metodologia Usada na Elaboração do MODGEO-GO

O cálculo do MODGEO-GO considerou como ferramenta principal o pacote computacional canadense SHGEO - Stokes-Helmert GEOid software, elaborado pelo Departamento de Geodésia e Geomática da Universidade de New Brunswick (Ellman, 2005a; 2005b). Detalhes de toda a formulação envolvida no processo pode ser encontrada em Castro Júnior, 2018. O fluxograma apresentado na Figura 7 permite uma visão geral do processo.

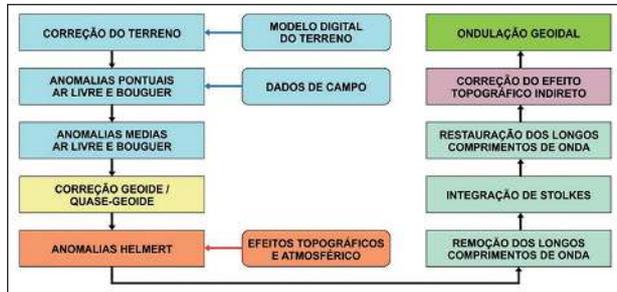


Figura 7 Etapas da elaboração de um modelo geoidal (modificado de Blitzkow et al., 2016)

A expressão de Stokes, representada em (1) e detalhada posteriormente, foi utilizada para a obtenção da ondulação geoidal (N) correspondente às coordenadas geocêntricas $\Omega (\varphi, \lambda)$. Considera R o raio médio da Terra; r o raio geocêntrico; $SM(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega'))$ o núcleo modificado de Stokes; $\psi(\Omega, \Omega')$ denota a distância esférica entre o ponto a ser calculado e os pontos de integração; $\Delta g(r_g, \Omega)$ representa a anomalia gravimétrica residual; $d\Omega'$ retrata a área do elemento de integração; e, o último termo $\frac{\delta V'(r_g, \Omega)}{\gamma_0(\phi)}$ é a correção do efeito topográfico indireto primário (Ellmann & Vaníček, 2007).

$$N(\Omega) = \frac{R}{4\pi_0(\phi)} \int_{\Omega_{\psi_0}} S^M(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega')) \Delta g(r_g, \Omega) d\Omega' + \frac{R}{2\gamma_0(\phi)} \sum_{n=2}^M \frac{2}{n-1} \Delta g_n^h(r_g, \Omega) + \frac{\delta V'(r_g, \Omega)}{\gamma_0(\phi)} \quad (1)$$

sendo a anomalia gravimétrica residual sobre o geóide expressa por (2):

$$\Delta g(r_g, \Omega) = \left(\Delta g^h(r_g, \Omega) - \sum_{n=2}^M \Delta g_n^h(r_g, \Omega) \right) \quad (2)$$

A formulação original de Stokes concebia a integração de dados gravimétricos, e consequentemente das anomalias de gravidade, em todo o planeta. Entretanto, isso é contornado, na prática, por meio da adoção de um MGG e da modificação do núcleo da integral de Stokes, visando restringir a área de integração. No MODGEO-GO foi levado em conta um raio limitante de 1° , utilizando o núcleo de Stokes modificado $SM(\psi_0, \psi(\Omega, \Omega'))$, proposto por Featherstone (2003), definido como uma combinação da modificação do núcleo de Stokes (Vaníček & Kleusberg, 1987), juntamente com a de Meissl (1971).

5 Resultados e Discussão

Concluídas as 10 etapas do processamento, foram gerados 6 modelos geoidais a partir dos MGGs: EIGEN-6C4, GOCO05c e GECO, sendo que 3 modelos foram obtidos utilizando grau e ordem dos MGGs até 200 e os outros três até 250, na etapa de remoção dos longos comprimentos de onda. Face à similaridade visual entre eles, escolheu representar apenas o cartograma do modelo utilizando o MGG EIGEN-6C4 até grau e ordem 250 (Figura 8).

A maneira usual de se avaliar a consistência e convergência de um modelo geoidal gravimétrico está correlacionada com a comparação das ondulações geoidais oriundas do modelo e aquelas obtidas diretamente pelas diferenças entre as altitudes geodésicas, advindas de receptores GNSS, com as altitudes ortométricas fornecidas por estações altimétricas da RAAP. Assim, no intuito de validar o MODGEO-GO, foram ocupadas 140 RRNN com receptores geodésicos, segundo os procedimentos mencionados em 3.4. Posteriormente houve a comparação entre os resultados auferidos por esses dois processos e decorrentes análises estatísticas

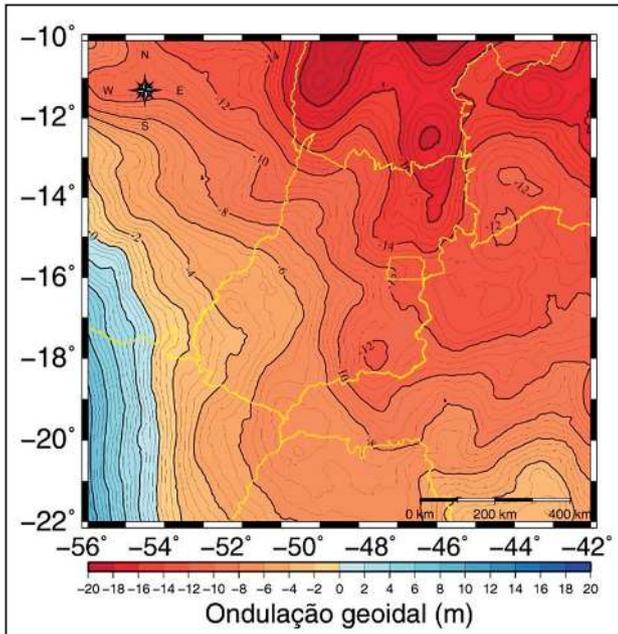


Figura 8 MODGEO-GO calculado com MGG EIGEN-6C4 (n=m=250) (valores em metro)

para cada um dos MGGs adotados. Na seleção das estações altimétricas da RAAP tomou-se o cuidado de considerar apenas aquelas RRNN que pertenciam a circuitos fechados, com altitudes ajustadas, onde foi possível obter os respectivos desvios padrão.

A consistência do MODGEO-GO pode ser evidenciada pelos valores numéricos expressos no quadro comparativo da Tabela 2. Esses dados denotam as discrepâncias absolutas pontuais entre as ondulações geoidais das 140 estações ocupadas e as ondulações obtidas através dos três modelos calculados. O MAPGEO2015 também foi evidenciado na comparação.

Observa-se na tabela, na primeira coluna, a média aritmética de tais diferenças, seguidas das diferenças padrão médias, máximas e mínimas nas

Modelo Geoidal	Média	Dif. Padrão	Máx.	Min.
MAPGEO2015 (EIGEN-6C4 (200))	-0,09	0,14	0,31	-0,37
GEOID-GO EIGEN-6C4 (200)	-0,12	0,16	0,22	-0,30
GEOID-GO EIGEN-6C4 (250)	-0,09	0,13	0,26	-0,29
GEOID-GO GECO (200)	-0,12	0,16	0,20	-0,34
GEOID-GO GECO (200)	-0,09	0,13	0,23	-0,32
GEOID-GO GOCO05c (200)	-0,12	0,16	0,23	-0,34
GEOID-GO GOCO05c (250)	-0,09	0,13	0,24	-0,34

Tabela 2 Comparação entre as ondulações geoidais das 140 RRNN com os modelos geoidais calculados (valores em metros)

colunas subsequentes. Emprega-se o conceito de “diferença padrão” ao invés do “erro médio quadrático” (RMS error - Root Mean Square error), devido ao fato de que os valores das ondulações comparadas advêm de grandezas independentes e com origens distintas, tendo em vista que as ondulações geoidais advindas do GNSS e RAAP possuem caráter puramente geométrico, enquanto as oriundas do MODGEO-GO têm conotação física vinculada ao campo de gravidade da Terra.

Outro forte indício de que o MODGEO-GO está consistente em termos estatísticos é denotado pela estreita similaridade entre os histogramas correspondentes a cada um dos MGG empregados no processamento. Os gráficos inseridos na Figura 9 mostram que a maioria das estações GNSS/nivelamento possuem diferenças entre $\pm 0,20$ m. Observa-se também um deslocamento do histograma, em termo de distribuição normal, função do valor da média ser negativo ($\sim -0,12$ m).

Devido à convergência observada pelas análises estatísticas contidas na Tabela 2 e nos histogramas apresentados, retratando a desejável similaridade entre os modelos, seria plenamente possível a adoção de qualquer uma das versões calculadas. Entretanto, conforme já mencionado, optou-se pela alternativa que usou o MGG EIGEN-6C4, por ter sido a mesma adotada pelo MAPGEO2015. Após essa escolha foi possível proceder à avaliação do MODGEO-GO diante do último modelo geoidal nacional.

Adicionalmente às grandezas estatísticas apresentadas foi conveniente efetuar uma avaliação espacial do MODGEO-GO. Por conseguinte, os cartogramas inseridos na Figura 10, ilustram a comparação utilizando o modelo geoidal baseado no MGG EIGEN-6C4, para grau e ordem 200 e 250, além da localização aproximada das 140 estações disponíveis, possibilitam deduções sobre as regiões onde o MODGEO-GO está mais vulnerável. Assim, por meio dessa análise visual, observa-se que as áreas de Goiás com maior discrepância entre as diferenças padrão para os modelos são praticamente as mesmas.

As análises visuais possibilitaram também a identificação de um caso curioso onde, apesar das informações gravimétricas disponíveis, ainda há discrepâncias que merecem a devida atenção. Isso ocorreu no sul do estado, nas circunvizinhanças da

O Modelo Geoidal de Goiás – MODGEO-GO

Carlos Alberto Correa e Castro Júnior; Gabriel do Nascimento Guimarães & Nilson Clementino Ferreira

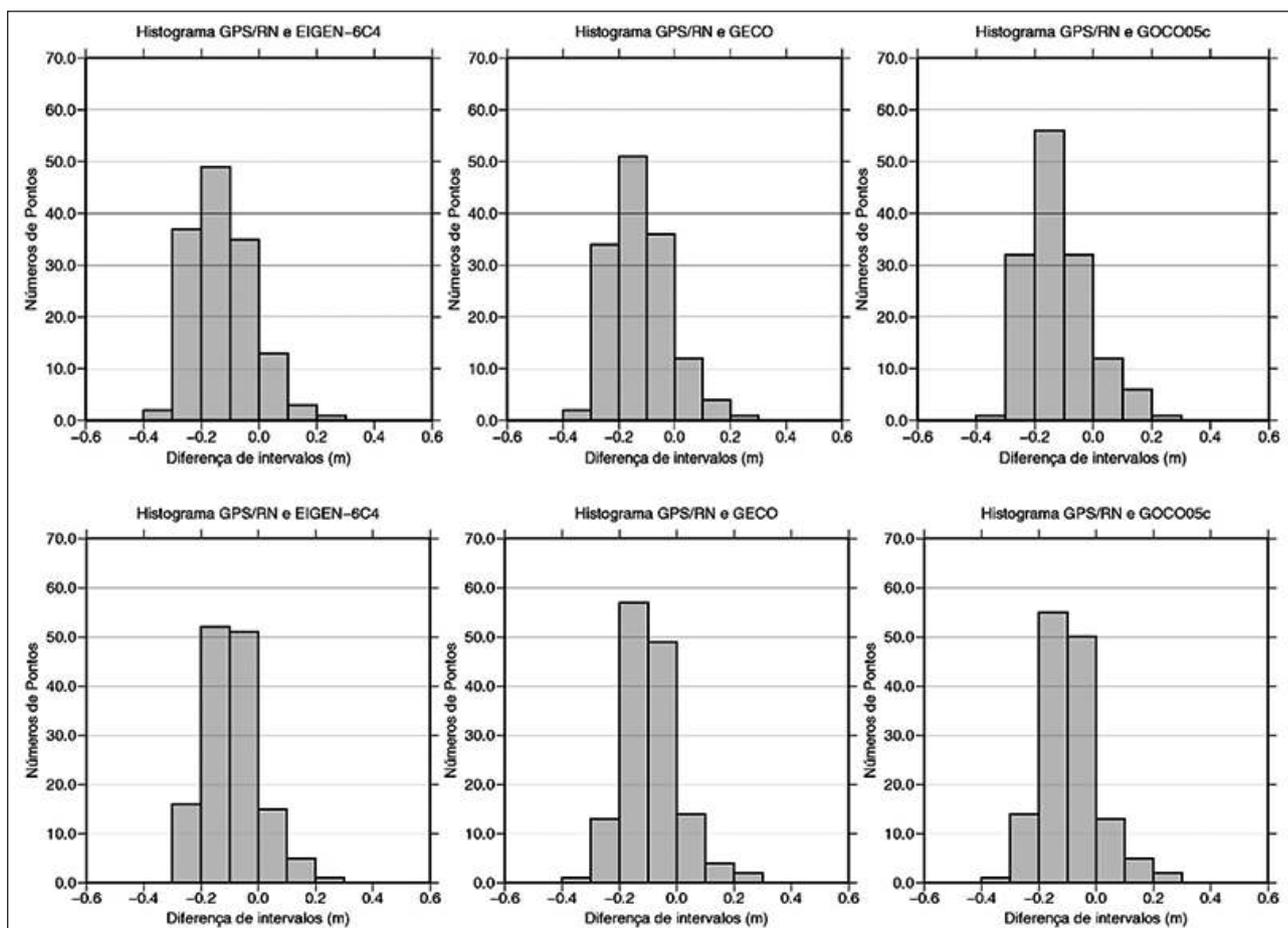


Figura 9 Histogramas das discrepâncias auferidas nas estações (GNSS/RN) usadas na avaliação do MODGEO-GO para os três MGGs. Na parte superior utilizando até grau e ordem 200. Na parte inferior grau e ordem 250

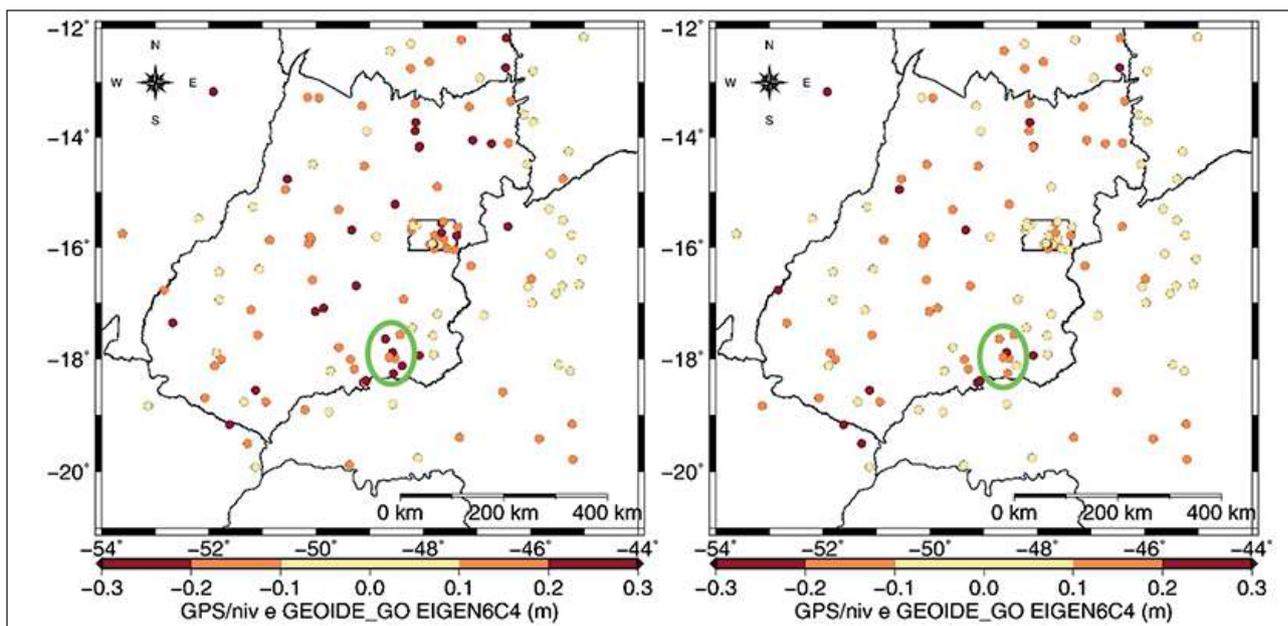


Figura 10 Discrepâncias da comparação das 140 GNSS/nivelamento com os modelos geoidais EIGEN-6C4. À esquerda utilizando grau e ordem 200 e à direita grau e ordem 250

Serra de Caldas Novas, devido, provavelmente, à estrutura geológica local, composta basicamente por rochas de altas densidades. Em razão disso houve, no final de 2016, a reocupação de diversas RRNN nessa região, visando uma avaliação mais minuciosa. Os resultados auferidos por tais medições revelam diferenças-padrão que variam entre 0,1 e 0,3 m, apontando para a necessidade de maior densificação de EEGG e, possivelmente, de estudos complementares na região em questão. A Figura 12 denota essa atipicidade ao apresentar os resultados das estações de controle medidas na região; percebe-se, ademais, a semelhança do contorno da isolinha modelada com a conformação topográfica da Serra de Caldas Novas.

Indo mais adiante nessa avaliação, depreende-se que as regiões com diferenças padrão mais acentuadas quase sempre coincidem com as áreas mais carentes de informações gravimétricas terrestres. A Figura 11 (MGG EIGEN6C4 n=m=200) traz uma interessante superposição do arcabouço gravimétrico utilizado no cálculo do MODGEO-GO com as 140 RRNN medidas diretamente. Subliminarmente a figura indica quais deverão ser as prioridades gravimétricas para os próximos anos no estado de Goiás.

6 Considerações Finais

Diante do exposto é possível constatar que o MODGEO-GO produziu resultados alvissareiros e

coloca Goiás na linha de frente da Geodésia brasileira. Cabe assinalar que os resultados auferidos pelo MODGEO-GO, de ordem decimétrica, dificilmente poderiam ser melhores, em razão de que as RRNN integrantes da RAAP, usadas para avaliação e validação do modelo, possuem, em Goiás, uma precisão que varia entre 7 e 8 cm (IBGE, 2017).

A expressiva quantidade de 32446 estações gravimétricas utilizadas na modelagem, validadas por um número não menos expressivo de 140 estações de controle, possibilitarão à comunidade usuária a obtenção de altitudes mais precisas e condizentes com as necessidades modernas.

É intenção dos autores disponibilizar o MODGEO-GO no portal do Instituto Mauro Borges (IMB), com vistas a facilitar a consulta on line dos usuários. Além disso, a continuada densificação gravimétrica empreendida em Goiás nos anos subsequentes permitirá o cálculo de futuras versões do modelo com possíveis ganhos qualitativos.

7 Agradecimentos

Complementando, é imprescindível externar os agradecimentos aos pesquisadores Denizar Blitzkow e Ana Cristina Cancoro de Matos pela disponibilização

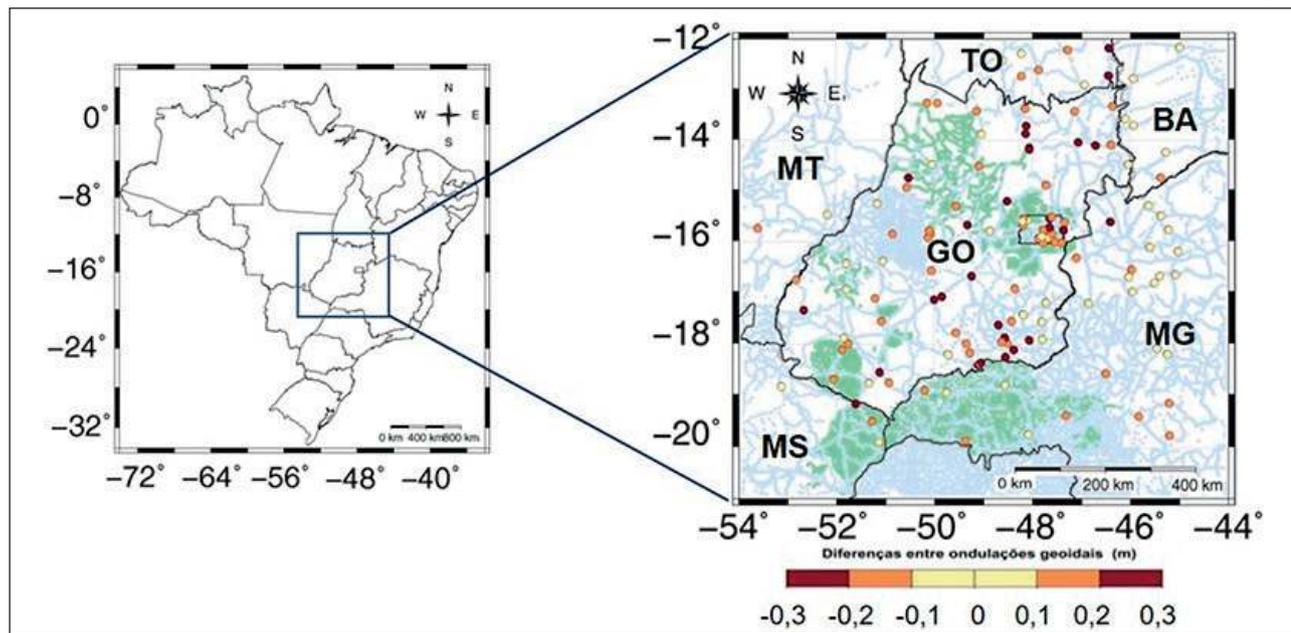


Figura 11 Correlação entre as diferenças padrão das 140 estações GNSS/nivelamento com a densidade de densificação gravimétrica existente. A coloração azulada representa as EEGG mais antigas enquanto as esverdeadas compreendem as EEGG medidas a partir de 2013

do pacote computacional SHGEO, cessão de dados e significativas contribuições ao presente artigo.

8 Referências

- Blitzkow, D.; Matos, A.C.O.C.; Guimarães, G.N.; Pacino, M. C.; Lauria, E.A.; Nunes, M.A.; Castro Junior, C.A.C.; Flores, F.; Guevara, N.H.; Alvarez, R. & Hernandez, J.N. 2016. Gravity and Geoid Model for South America. *In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, VIENA. EGU Proceedings...* Viena. Disponível em: < <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-1626.pdf> >. Acesso em: 05 mar. 2017.
- Castro Júnior, C.A.C. 2018. *Arcabouço Gravimétrico Brasileiro e o Meio Ambiente: Possibilidades e Perspectivas*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade Federal de Goiás, Tese, 234p.
- Ellmann, A. 2005a. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation. *reference manual I*, 36 p.
- Ellmann, A. 2005b. SHGEO software packages-An UNB Application to Stokes-Helmert Approach for Precise Geoid Computation. *reference manual II*, 43 p.
- Ellmann, A. & Vaníček, P. 2007. UNB application of Stokes-Helmert's approach to geoid computation. *Journal of Geodynamics*, 43(2): 200-213.
- Featherstone, W.E. 2003. Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination. *Computer & Geosciences*, 29(2): 183-193.
- Fecher, T.; Pail, R. & Gruber, T. 2016. The combined gravity field model GOCO05c. *In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, Viena. EGU Proceedings...* Viena. Disponível em: < <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7696.pdf> >. Acesso em: 05 mar. 2017.
- Förste, C.; Bruinsma, S.L.; Abrikosov, O.; Flechtner, F.; Marty, J.C.; Lemoine, J.M.; Dahle, C.; Neumayer, H.; Barthelmes, F.; König, R. & Biancale, R. 2016. EIGEN-6C4: The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse. *In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2016, Viena. EGU Proceedings...* Viena, 2016. Disponível em: < <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7696.pdf> >. Acesso em: 05 mar. 2017.
- Gilardino, M.; Reguzzoni, M. & Sampietro, D. 2016. GECO. A global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(2): 228-247.
- Goldani, D. 2006. *Modelo Geoidal de Alta Resolução Para o Estado do Paraná: Aplicação da Transformada Rápida de Fourier – Stokes e do Valor do Potencial do Geoide na Definição da Superfície de Referência Vertical*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Dissertação de Mestrado, 129p.
- Guimarães G.N. 2010. *A altimetria e o modelo geoidal no Estado de São Paulo*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 119p.
- Guimarães, G.N. 2013. *A Geoid Model in the State of São Paulo: An Attempt for the Evaluation of Different Methodologies*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 144p.
- Guimarães, G.N.; Matos, A.C.O.C. & Blitzkow, D. 2015. O Quase-Geoide do Estado de São Paulo e a Avaliação dos Modelos Recentes do GOCE. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67(8): 1707-1721.
- Lobianco, M.C.B. 2005. *Determinação das alturas do geoide no Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 165p.
- Matos, A.C.O.C. & Blitzkow, D. 2008. *Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3" para a América do Sul*. Relatório de Pós-Doutorado. Período: março de 2007 a fevereiro de 2008. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 38p.
- Matos, A.C.O.C. & Blitzkow, D. 2009. *Refinamento do Modelo Digital de Terreno (MDT) de 3" de arco para a América do Sul*. Relatório de Pós-Doutorado. Período: março de 2008 a fevereiro de 2009. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 27p.
- Matos, A.C.O.C.; Blitzkow, D.; Machado, W.C.; Nunes, M.A.; Lengruber, N.V.; Xavier, E.M.L. & Fortes, L.P.S. 2017. MAPGEO2015: o Novo Modelo de Ondulação Geoidal do Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(10): 1873-1884.
- Meissl, P. 1971. Preparations for the Numerical Evaluation of Second-Order Molodensky-Type Formulas. *Ohio State University Report*, 163, Columbus, USA.
- Silva, M.A. 2002. *Obtenção de Um Modelo Geoidal para o Estado de São Paulo*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado, 156p.
- Schwarz, K.P.; Sideris, M.G. & Forsberg, R. 1987. Orthometric Heights Without Leveling. *Journal of Surveying Engineering*, 113(1): 28-40.
- Vaníček, P. & Kleusberg, A. 1987. The Canadian Geoid-Stokesian Approach. *Manuscripta Geodaetica*, 12(2): 86-98.
- Vaníček, P.; Santos, M. S.; Tenzer, R. & Navarro, A. H. 2003. Algunos Aspectos Sobre Alturas Ortométricas y Normales. *Revista Cartográfica*, 76/77(1): 79-86.