



Análise da Variação Temporal das Altitudes Elipsoidais e Ortométricas em Estações da RBMC a Partir de Dados GNSS e Dados GRACE

Analysis of the temporal variation of ellipsoidal and orthometric heights from RBMC stations based on GNSS and GRACE data

Antonio Carlos França Cagido¹
Regiane Dalazoana²

Recebido em novembro de 2017.
Aprovado em abril de 2018.

RESUMO

Este artigo tem o propósito de analisar o uso de diferentes modelos mensais do geopotencial, provenientes da missão GRACE e disponibilizados através do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*), na avaliação da variação temporal da componente vertical (coordenada altitude) em estações pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). A pesquisa visa analisar a variação temporal das altitudes elipsoidais (componente geométrica) num conjunto de estações pertencentes a RBMC, e relacionar com a variação temporal das altitudes ortométricas (componente com significado físico). Os materiais para o cumprimento deste estudo compreendem séries temporais de coordenadas geodésicas de 18 estações da RBMC, no intervalo de tempo entre janeiro de 2012 a julho de 2015 e modelos mensais do geopotencial da missão GRACE provenientes de três centros de processamento: o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), o *GeoForschungsZentrum* (GFZ) e o *Center for Space Research* (CSR). Dos modelos mensais do geopotencial são obtidos, para cada estação ao longo do tempo, os valores da funcional altitude geoidal, e a partir destes são calculadas as altitudes ortométricas. A metodologia empregada envolve a determinação da reta de tendência das séries temporais de altitudes bem como a comparação das taxas de variação anual das altitudes elipsoidais e das altitudes ortométricas. Também foi feita a determinação da correlação entre as séries temporais de altitudes elipsoidais, altitudes ortométricas e altitudes geoidais. Os modelos utilizados foram desenvolvidos até os graus 60, 90 e 96. As taxas de variação da altitude ortométrica, obtida a partir da altitude geoidal derivada do modelo JPL RL05 desenvolvido até grau 60 e do modelo JPL RL05 desenvolvido até grau 90, são mais similares às taxas de variação da altitude elipsoidal, do que as taxas geradas a partir dos outros modelos desenvolvidos até os mesmos graus. Do total de estações empregadas na pesquisa e considerando o modelo JPL desenvolvido até grau

¹Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Brasil. E-mail: antonioc.cagido@gmail.com

²Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Brasil. E-mail: regiane@ufpr.br

60 e grau 90, respectivamente, 38,9% e 33,3% apresentaram taxas iguais de variação de altitude ortométrica e elipsoidal. Com relação às correlações entre as altitudes elipsoidais e ortométricas, observa-se que as séries temporais de altitude ortométrica geradas a partir dos modelos mensais do geopotencial desenvolvidos até grau 60 tiveram maior correlação com os dados das altitudes elipsoidais, do que as altitudes geradas com os modelos desenvolvidos em graus maiores, o que indica uma melhor correspondência entre as variações temporais da altitude elipsoidal e modelos mensais do geopotencial desenvolvidos até grau 60.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos Mensais do Geopotencial. GRACE. Altitudes. Variação Temporal.

ABSTRACT

This paper aims to analyze the use of different monthly solutions of geopotential models coming from GRACE mission and made available through ICGEM (International Center for Global Earth Models) in the evaluation of the temporal variation of the vertical component (height coordinate) at stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems (RBMC). The main focus of this research is to analyze the temporal variation of ellipsoidal heights (geometric component) in a set of RBMC stations, and to relate it to the temporal variation of orthometric heights (component with physical meaning). The materials used for the accomplishment of this study comprise time series of geodetic coordinates of 18 RBMC stations, in the time span between January 2012 and July 2015, and monthly solutions of geopotential coming from GRACE mission and provided by three processing centers: Jet Propulsion Laboratory (JPL), GeoForschungsZentrum (GFZ) and the Center for Space Research (CSR). The orthometric heights are calculated, for each station over time, through geoid functionals coming from the monthly solutions of the geopotential models. The methodology applied involves the determination of heights time series trend lines, as well as the comparison of the annual variation rates of ellipsoidal and orthometric heights. The determination of the correlation between the time series of ellipsoidal and orthometric heights and geoid was also determined. The geopotential models used were developed up to degrees 60, 90 and 96. The orthometric height variation rates, obtained from the geoid functional derived from JPL R05 model developed up to degree 60 and JPL RL05 model developed up to degree 90, are closer to the variation rates of the ellipsoidal height than those generated from other models developed up to the same degrees. From all the stations used in this research and considering JPL model developed up to degrees 60 and 90, respectively, 38.9% and 33.3% presented identical variation rates for both orthometric and ellipsoidal height. Regarding the correlation between the heights, it is possible to verify that the orthometric heights times series generated from models developed up to degree 60 are the ones which best correlate with the ellipsoidal height times series, to the detriment of higher degrees solutions: this indicates a better correspondence between temporal variations of ellipsoidal heights and monthly solutions of geopotential models developed up to degree 60.

KEYWORDS: Monthly Geopotential Models. GRACE. Height. Time Variation.

* * *

Introdução

O avanço dos estudos com base no rastreamento dos satélites artificiais, a partir da década de 1960, possibilitou uma revolução para a Geodésia na construção de modelos do geopotencial, disponibilizados como coeficientes de expansões em funções harmônicas esféricas, usados para modelar as funcionais do campo da gravidade da Terra. Com a melhoria na modelagem da órbita dos satélites artificiais e com o lançamento de missões espaciais voltadas especificamente para a melhoria da modelagem do campo da gravidade da Terra, surgiu então a possibilidade de observar as variações temporais deste campo. Os valores do campo da gravidade estão sujeitos às alterações causadas por diversos fatores geodinâmicos como listados por Bomford (1971): movimento polar e variação na velocidade angular da Terra, movimento de massas derivados de uma série de fatores, como por exemplo: do movimento periódico da Lua e do Sol em relação à Terra (maré terrestre), terremotos, ciclos hidrológicos, marés oceânicas, movimento das placas tectônicas e vulcanismo.

Vários estudos relacionados com a movimentação de massas no Sistema Terra estão sendo realizados com base em modelos mensais do campo da gravidade derivados dos dados da missão GRACE. Como exemplo pode-se citar estudos visando determinar variações de massa d'água a fim de verificar se estas variações estão de acordo com modelos hidrológicos (CAZENAVE e CHEN, 2010; TIWARI et al., 2014; SUN et al., 2016).

Além de estudos hidrológicos, os modelos do satélite GRACE são utilizados na avaliação de variações temporais da superfície do geóide ou em conjunto com dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) na estimativa de deformações verticais da crosta (VAN DAM et al., 2007; VAN DER WAL et al., 2010; ALVES COSTA et al., 2012; HAO et al., 2016).

No que tange a parte das altitudes com significado geométrico, o avanço tecnológico das técnicas de posicionamento espacial e o estabelecimento de redes ativas, como a RBMC, tem papel de suma importância na manutenção

e na atualização da estrutura geodésica no Brasil. Principalmente devido a concepção moderna do referencial SIRGAS2000 (ALVES COSTA et al., 2008). Já a utilização dos modelos derivados da missão GRACE, nas determinações das variações temporais do campo da gravidade, pode contribuir para o acompanhamento temporal das altitudes com significado físico.

A perspectiva de abordagem das Ciências Geodésicas sobre a modelagem da variação temporal da componente vertical tem sido explorada no âmbito global. Nesse sentido podem-se citar os trabalhos de Ihde e Sánchez (2005) e Burša et al (2006). Sendo que pesquisas relacionadas a aplicações dos modelos do geopotencial têm ocorrido pelo mundo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é verificar a potencialidade de uso conjunto de séries temporais de dados GNSS e de modelos mensais do geopotencial da missão GRACE no monitoramento temporal da componente altimétrica em estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC). O acompanhamento temporal das altitudes ao longo do tempo (dh/dt , dH/dt , dN/dt) é uma tarefa importante no contexto da unificação dos sistemas de referência vertical existentes e na manutenção da componente vertical da Rede de Referência SIRGAS que trata das componentes de altitudes física e geométrica no território brasileiro.

2 Aspectos Relacionados ao Referencial Vertical

Ao relacionarmos as características presentes de realização e conexão de diferentes *data* verticais, certas carências são discutidas por diversos países em termos de qualidade e deficiência de dados, como: problemas de acumulação dos erros de observação, e as dificuldades de conexão de redes de nivelamento sobre áreas muito amplas. Além disso, não se pode resolver o problema do transporte da altitude dos pontos de referência nacionais para as ilhas ou de um continente para outro através dos oceanos (ARDALAN et al., 2010).

Sob a definição clássica de sistemas de altitude, o nível de referência W_0 para a América do Sul poderia ser a superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra passando por uma marca de referência em um marégrafo selecionado. Esta seleção poderia resolver a unificação necessária dos sistemas de altitude existentes na região, mas ainda seria uma solução do sistema local; isto é, suas altitudes associadas (ou número geopotencial) seriam consistentes na América do Sul somente (SÀNCHEZ, 2007).

Desde a década de 80, vêm sendo debatidos conceitos para a realização de um IHRS (*International Height Reference System*), isto é, a unificação dos sistemas de altitudes existentes bem como a definição de parâmetros fundamentais para sua realização. Esses tópicos vêm sendo discutidos pela IAG (*International Association of Geodesy*), através de comissões e grupos de estudo especiais, além de várias publicações sobre o tema (IHDE e SÀNCHEZ, 2005).

Com a evolução tecnológica, e conseqüentemente o desenvolvimento das técnicas de posicionamento espacial (por satélite), e conforme Rummel (2000), os métodos de unificação de altitudes podem ser determinados das seguintes maneiras: (1) por nivelamento geodésico associado com altimetria por satélite; (2) nivelamento oceanográfico; (3) posicionamento por satélite associado com determinações de gravidade, e (4) que envolve o problema de valor de contorno da Geodésia (PVCG), que foram abordados com detalhes por De Freitas et al. (2007); Burša et al. (2006); De Freitas et al. (2010).

Atualmente, também se faz necessária a verificação da variação temporal da rede vertical para buscar uma melhor acurácia das componentes altimétricas além da necessidade de manutenção da rede ao longo do tempo. A variação temporal se dá tanto na componente relacionada ao aspecto físico quanto no aspecto geométrico. Com isso um modelo das variações temporais geoidais irá garantir que a variação temporal das altitudes geoidais possa ser calculada para uma época arbitrária depois da época de referência inicial (RANGELOVA et al., 2012).

Para esta pesquisa foi verificada uma forma de análise de acompanhamento temporal das altitudes, que por questões científicas, foi abordada no simpósio da IAG, realizado durante a 26ª assembleia geral da IUGG (*International Union of Geodesy and Geophysics*) na cidade de Praga em 2015, quando no simpósio sobre unificação de sistemas de altitudes (*G06 unifying height systems*) salientou-se a importância de determinar e modelar a variação temporal das componentes verticais, visando o estabelecimento de um sistema de altitude unificado.

Em relação ao sistema de referência vertical SIRGAS, este é baseado nas componentes geométrica e física. A componente geométrica adota atualmente, o elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*), para relacionar à forma geométrica da Terra e assim determinar a altitude elipsoidal. Esta componente já está bem resolvida. A componente física, segundo Sánchez (2007), implica nos cálculos dos números geopotenciais para um ajustamento continental, na determinação de um modelo quase-geoidal unificado para o continente, além das transformações do sistema de altitude clássico para o sistema de altitude moderno.

A adoção de um sistema de altitude moderno é importante, pois atualmente a componente vertical do SIRGAS não é completamente integrada, devido ao fato dos sistemas de altitudes clássicos não serem compatíveis com as altitudes elipsoidais obtidas pelas técnicas GNSS. Eles referem-se ao Nível Médio do Mar (NMM) determinado por marégrafos individuais em cada País, em épocas diferentes entre eles, e se utilizam geralmente de altitudes niveladas que não são corrigidas dos efeitos do campo da gravidade (DREWES, et al., 2002).

O Grupo de Trabalho III – Datum Vertical do Projeto SIRGAS (SIRGAS-GT-III), atualmente busca adotar um método para o estabelecimento de um sistema único com base na integração dos Sistemas Verticais de Referência Nacionais (SVRN) ao Sistema Vertical de Referência Global (SVRG). Para alinhar a este propósito, o SIRGAS-GT-III está olhando para as normas relativas ao Sistema Vertical de Referência SIRGAS (SVRS)

considerando a integração de seus componentes geométricos e físicos (DE FREITAS, 2015). A solução prevista é estruturada com base na padronização das bases de dados das redes verticais nacionais convencionais e incorporação de dados globais oriundos de plataformas orbitais tais como gravimetria por satélite, altimetria por radar e GNSS (SÀNCHEZ e DE FREITAS, 2016).

3 Modelos Globais do Geopotencial

Os modelos globais do geopotencial (MGG) são geralmente fornecidos como coeficientes de uma expansão em séries de funções harmônicas esféricas truncadas em determinado grau e ordem, que podem ser usados para calcular o campo de gravidade. O campo de gravidade da Terra é usualmente expresso em termos de uma série de funções harmônicas esféricas até um grau máximo (n), que pode ser associado ao mais curto comprimento de onda (λ) na superfície da esfera usada na expansão de acordo com a equação (1) (SEEBER, 2003):

$$\lambda = \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

Em seu trabalho, Featherstone (2002), separou os MGG segundo três classes que levam em conta os métodos de obtenção de dados para criação dos modelos:

a) modelos do geopotencial satélite-somente, utilizam somente os valores determinados por satélites artificiais, sem a utilização de outras fontes de dados de gravidade;

b) modelos do geopotencial combinados: na determinação dos modelos são usados diferentes dados de gravidade, como a junção de diferentes técnicas: satélites artificiais, gravimetria terrestre, gravimetria aerotransportada, gravimetria marinha, altimetria por satélite;

c) modelos do geopotencial adaptados, são determinados com base num modelo já criado, com nova implementação dentro de uma determinada região.

Conforme Barthelmes (2013), os coeficientes das funções harmônicas esféricas, também chamados de coeficientes de Stokes, representam o domínio espectral da estrutura global e as irregularidades do campo de gravidade terrestre. A equação (2) adaptada de Gemael (2012) e Barthelmes (2013), expressa o geopotencial (W) para um ponto qualquer (r, φ, λ) na superfície da Terra ou acima dela, onde:

$$W(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[1 + \sum_{n=2}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r}\right)^n P_{nm}(\text{sen } \varphi) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \text{sen } m\lambda) \right] + \frac{1}{3} \omega^2 r^2 [1 - P_{20}(\text{sen } \varphi)] \quad (2)$$

(r, φ, λ) são as coordenadas geocêntricas do ponto de cálculo, respectivamente: distância do ponto ao geocentro, latitude e longitude;

(R) é o raio de referência equatorial (semieixo maior do elipsoide de referência);

(GM) a constante gravitacional geocêntrica;

(n, m) respectivamente o grau e a ordem do desenvolvimento;

(P_{nm}) funções de Legendre normalizadas, e

(\bar{C}_{nm} e \bar{S}_{nm}) os coeficientes de Stokes normalizados.

Um dos funcionais relacionados com o campo da gravidade, a altitude geoidal (N), é uma grandeza física derivada da expressão do geopotencial podendo ser calculada a partir dos coeficientes de Stokes para um dado grau n , como mostra a equação (3), a partir de modificações matemáticas de Gemael (2012), onde:

$$N(r, \varphi, \lambda) = \frac{GM}{r\gamma} \sum_{n=0}^{max} \left(\frac{R}{r}\right)^n \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \text{sen } m\lambda) \bar{P}_{nm}(\text{sen } \varphi)$$

$$-\frac{2\pi G\rho}{\gamma}R\sum_{n=0}^{\max} \sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \bar{P}_{nm}(\sin \varphi) \quad (3)$$

(γ) é a gravidade normal que varia conforme a latitude do ponto,
 (ρ) a densidade

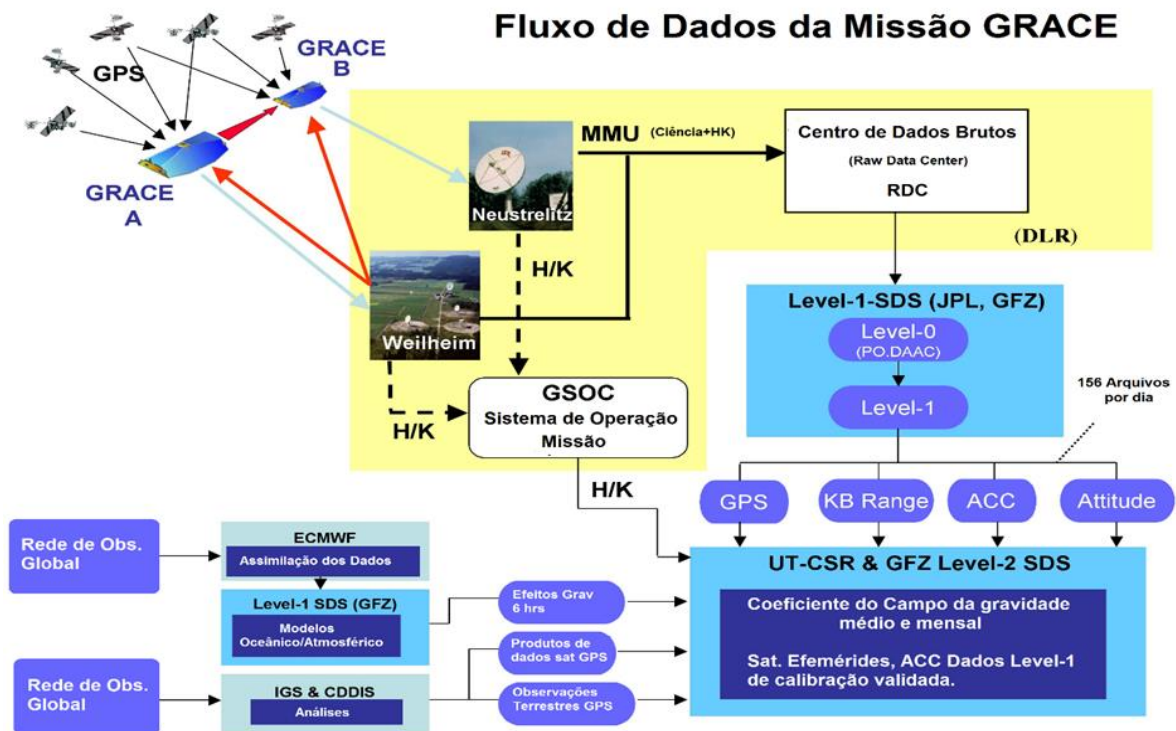
3.1 A missão GRACE

A missão GRACE, lançada em 17 de março de 2002 e finalizada no dia 27 de outubro de 2017, teve como propósito a obtenção da estimativa média das componentes das variações temporais do campo gravitacional. Este objetivo foi alcançado, a partir de contínuas medições entre dois satélites idênticos (gêmeos) utilizando um sistema de rastreamento em micro-ondas. Os satélites possuem uma órbita quase polar (89° de inclinação) e com altitude média de aproximadamente 480 km. A orientação e a posição do satélite são mensuradas utilizando câmeras zenitais idênticas e um receptor GPS, respectivamente. (BALMINO, 2002)

Em relação ao sistema de dados científicos, *Science Data System* (SDS) do GRACE, ele atua no processamento dos dados o qual é compartilhado entre o *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), a Universidade do Texas *Center for Space Research* (CSR) e o *GeoForschungsZentrum* (GFZ) de *Potsdam*. O SDS é projetado para executar todas as tarefas para o processamento do campo de gravidade através da produção dos MGG, disponibilizados mensalmente. (BETTADPUR, 2012).

O fluxo geral de dados para a missão GRACE é apresentado na Figura 1. Em geral, todos os dados científicos foram coletados continuamente durante a missão (CSR, 2017).

Figura 1 – Fluxo de Dados da Missão GRACE



Fonte: Adaptado de CSR (2017).

O SDS fornece modelos mensais do campo de gravidade da Terra e o distribui ao público via o *Physical Oceanography Distributed Active Archive Center* (PO.DAAC) do JPL e o *Information System and Data Center* (ISDC) do GFZ após a validação. Os produtos dos dados da missão GRACE são divididos em quatro níveis (BETTADPUR, 2012):

- a) Nível-0: é o resultado da recepção das informações da telemetria, armazenados e disponibilizados pelo *Raw Data Center* (RDC) da Missão GRACE no *Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) em Neustrelitz. A partir de cada satélite, dois arquivos de cada passagem são disponibilizados no arquivo. Esses dois arquivos são definidos como os produtos de dados de telemetria do GRACE.
- b) Nível-1A: neste nível, fatores de calibração dos sensores são aplicados de forma a converter os dados binários em dados para utilização em engenharia. Esses dados são processados e são convertidos para produtos de dados editados em taxas de 1-5 segundos.

Os produtos do Nível-1A não são distribuídos para o público (CSR, 2017). Os dados deste nível são reversíveis para Nível-0, e este nível inclui produtos de dados auxiliares necessários para processamento nos próximos níveis.

c) Nível-1B: os produtos incluem, por exemplo, a distância entre os satélites e sua taxa de variação, acelerações não gravitacionais em cada satélite, e órbitas (CSR, 2017). Os dados são marcados corretamente no tempo, e a taxa de amostragem de dados é reduzida das taxas mais altas dos níveis anteriores.

d) Nível-2, os produtos de dados incluem o campo de gravidade, como também, incluem os produtos de dados auxiliares gerados durante este processamento. Ocasionalmente, vários meses de dados são combinados para produzir uma estimativa do campo de gravidade estática. As estimativas mensais são distribuídas através do PO.DAAC ou ISDC.

3.2 Modelos Mensais do Geopotencial

Os modelos mensais do geopotencial são disponibilizados como dados de coeficientes de funções harmônicas esféricas aproximadamente de uma média mensal. Cada modelo disponibiliza os coeficientes de Stokes mensais normalizados. Através desses modelos do campo de gravidade em escalas global e regional, pode-se verificar, por exemplo, as variações de massa causadas por redistribuições de massa no ciclo global da água.

A primeira missão de satélite dedicada à propiciar o acompanhamento das variações de massa do sistema Terra mensalmente foi o GRACE. Através das pequenas variações do campo gravitacional da Terra se pode verificar a redistribuição de massa no planeta. Nas escalas temporais e espaciais dos dados derivados do GRACE, o sinal de gravidade reflete, principalmente, as variações de massa dentro da atmosfera, oceanos e água armazenada em terra. O GRACE não tem resolução vertical; todavia, existem funcionais que

podem ser obtidos de seus dados. Logo, não é possível dizer se uma variação de massa deduzida para alguma região em terra é causada pelas mudanças na água da superfície terrestre, ou na massa atmosférica acima da região (WAHR et al., 2006). Em seu trabalho, Schmidt et al. (2006) verificaram que nas maiores bacias hidrográficas do mundo, as redistribuições de massas hidrológicas sazonais são detectadas pela missão GRACE para comprimentos de onda de algumas centenas de quilômetros.

Os dados científicos oficiais GRACE, são gerados por três centros de processamento que determinam as soluções do campo gravitacional: GFZ, CSR e JPL. Os modelos mais recentes são denominados de GFZ Release-05 (RL05), CSR Release-05 (RL05) e JPL Release-05 (RL05), os quais foram utilizados para os cálculos das altitudes geoidais.

Os novos coeficientes dos Release-05 foram inicialmente processados exatamente como os coeficientes do Release-04, com a exceção de que as estimativas do geocentro são baseadas nos dados gravimétricos da missão GRACE combinados com arquivos de dados referentes a distribuição de massas na atmosfera e oceanos. As principais mudanças em relação ao Release-04 incluem um melhor conhecimento dos alinhamentos entre a câmera zenital, o acelerômetro, e o sistema de variação da faixa da banda (K) para dados do Nível-1B (CHAMBERS e BONIN, 2012).

Em relação aos três centros, segundo Chambers e Bonin (2012), o coeficiente $C_{2,0}$ nas soluções GFZ RL05 estão consideravelmente mais próximos das estimativas do *Satellite Laser Ranging* (SLR) do que as soluções CSR RL05 e JPL RL05, possivelmente devido ao GFZ usar um modelo temporal da gravidade baseado em coeficientes do Release-04, onde o valor $C_{2,0}$ foi substituído pelo valor do SLR. Em seu trabalho, os autores fizeram testes estatísticos com e sem substituição do coeficiente $C_{2,0}$ nos dados GFZ RL05, e constataram que não foram significativamente melhores. Como a substituição do coeficiente $C_{2,0}$ ainda é necessária para o CSR RL05 e o JPL RL05, os autores optaram por substituir o coeficiente, tanto do CSR quanto do JPL, para fornecer uma maior consistência entre os três centros.

4 Material e Métodos

Nesta sessão serão apresentados o material e os métodos que serão usados para fazer a análise da variação das séries temporais de altitudes elipsoidais de um conjunto de estações da RBMC, através do monitoramento contínuo das estações por GNSS; como também, para as determinações das altitudes geoidais dessas estações através dos modelos mensais do geopotencial obtidos a partir dos satélites GRACE. Neste trabalho serão utilizados modelos de três centros de processamento: CSR, GFZ e JPL, com diferentes graus de desenvolvimento: 60, 90 e 96.

4.1 Estações de Estudo

Na escolha das estações de estudo, todas pertencentes à RBMC, levou-se em consideração três critérios: o primeiro foi escolher estações com vínculo à Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) estabelecida por meio de nivelamento geométrico; o segundo critério levou em conta a existência de ao menos uma estação em cada região administrativa brasileira, e o terceiro critério foi trabalhar com estações da Região Sul do Brasil.

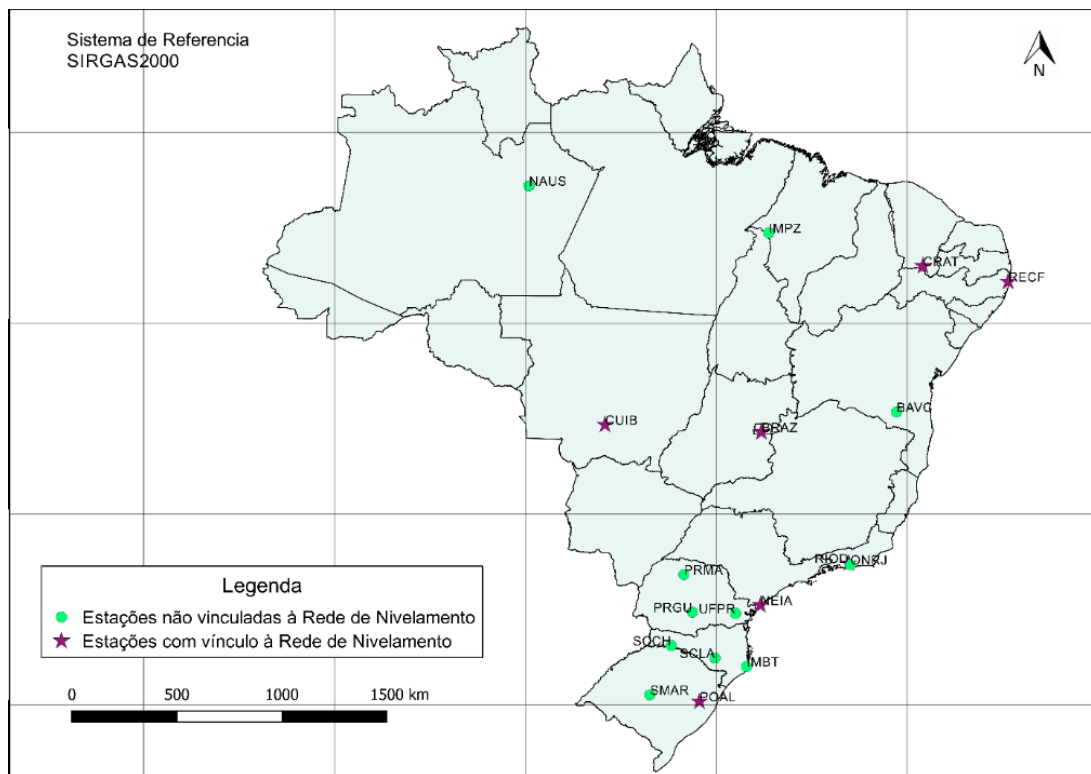
Nesta pesquisa, foram utilizadas dezoito estações da RBMC (BAVC, BRAZ, CRAT, CUIB, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA, ONRJ, POAL, PRGU, PRMA, RECF, RIOD, SCCH, SCLA, SMAR e UFPR). A figura 2 ilustra a localização destas estações.

4.2 Séries Temporais de Dados GNSS

Vale ressaltar que no âmbito da Rede de Referência SIRGAS, no qual as estações da rede permanente da RBMC estão inseridas, aquela é composta

de estações GNSS; sendo 423 estações GNSS de monitoramento contínuo, destas 338 ativas e 85 inativas, e 93 delas pertencentes à rede global do *International GNSS Service* (IGS) (SIRGAS, 2018a). A atual realização do SIRGAS é composta por uma rede de estações de monitoramento contínuo GNSS chamada de Rede GIRGAS de Operações Contínua (SIRGAS-CON). A rede SIRGAS-CON compreende: uma rede de cobertura continental (SIRGAS-C), e as redes de referência nacionais (SIRGAS-N). Maiores detalhes podem ser obtidos em <ftp://ftp.sirgas.org/>.

Figura 2 – Localização das estações da RBMC utilizadas para a realização da pesquisa.



Fonte: elaborada pelo autor.

O principal objetivo da rede SIRGAS-C é de assegurar a estabilidade a longo prazo das realizações, enquanto as redes SIRGAS-N visam a acessibilidade à rede de referência nos níveis locais e nacionais (SÀNCHEZ e DREWES, 2016).

Tanto a rede continental como as redes nacionais têm as mesmas características de qualidade. Os dados da rede SIRGAS-C são processados semanalmente pelo DGFI-TUM na Alemanha como centro de análise IGS-RNAAC-SIR (*IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS*). Já os dados das redes nacionais SIRGAS-N são processados por Centro de Processamento Locais SIRGAS, como o IBGE no Brasil. Estes centros geram soluções semanais semilivres (fracamente injuncionadas) das redes nacionais que são combinadas com a rede continental. A combinação é realizada pelo IBGE e pelo IGS-RNAAC-SIR e assegura a compatibilidade para posições e velocidades em todas as estações (continentais e de densificação) (SIRGAS, 2018b). Os resultados são disponibilizados para a comunidade através do servidor <ftp://ftp.sirgas.org/>.

As estações RBMC funcionam como elo entre o SGB e redes geodésicas internacionais. Todo o controle da RBMC é feito pela Diretoria de Geociências do IBGE (LOBIANCO, 2011). O IBGE disponibiliza as coordenadas semanais das estações da RBMC referenciadas ao sistema vigente do IGS. São disponibilizadas as coordenadas cartesianas tridimensionais (X, Y, Z), que posteriormente foram transformadas para coordenadas elipsoidais.

A definição dos períodos de análise das observações, foi baseada nas verificações dos dados combinados IGS que teve seu início a partir de 2012, também levou-se em consideração a disponibilidade de modelos mensais do satélite GRACE. A série temporal definida para a pesquisa foi de janeiro do ano de 2012 até julho de 2015. As informações referentes às coordenadas semanais GNSS, para este período, estão contidas em diretórios do IBGE compreendidos da semana GPS 1669 até a semana GPS 1856. Foram utilizados os arquivos (ibg12P1669) até (ibg15P1856), onde os três primeiros dígitos indicam o centro de combinação (IBG, IBGE e SIR: IGS-RNAAC-SIR); o quarto e quinto termo representam os dois dígitos finais do ano, o sexto dígito indica que foi feito o posicionamento com GPS e os quatro últimos dígitos representam a semana GPS (SIRGAS, 2018c).

4.3 Obtenção dos Dados GRACE – Funcional Altitude Geoidal

Para obtenção das informações referentes à funcional altitude geoidal, foram utilizados Modelos Globais do Geopotencial mensais do GRACE, classificados como satélite somente: GFZ RL05, CSR RL05 e JPL RL05. Estes são disponibilizados ao usuário por meio do ICGEM (*International Centre for Global Earth Models*), no seguinte endereço eletrônico <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>>.

Os conjuntos de coeficientes são completos até grau e ordem 90 para os modelos GFZ RL05 e JPL RL05 e grau e ordem 96 para o CSR RL05. Para a realização dos testes também foi feita a limitação do desenvolvimento em série até grau e ordem 60, devido ao aumento do erro de comissão nos modelos a partir do grau 60 e a menor contribuição do efeito hidrológico neste grau de desenvolvimento.

Para automatizar o processo de obtenção da funcional altitude geoidal no site do ICGEM, foi utilizado o programa *Single-Point GEM [Global Earth Models] Generator* (SPGG) (NICACIO JUNIOR e DALAZOANA, 2016), que fornece extratos dos modelos globais do geopotencial de forma pontual, através de uma lista de pontos com coordenadas latitude e longitude. Vale ressaltar que devido à recente mudança no site do ICGEM ocorrida em maio de 2017, o programa SPGG foi atualizado para a nova versão denominada, SPGG – v. 2.0.

Uma questão importante na geração de funcionais relacionadas aos modelos globais do geopotencial refere-se ao sistema de maré permanente que é escolhido para efeito de cálculo. Neste trabalho foi utilizado o sistema de Maré livre, visando a compatibilização com o sistema de marés utilizado na determinação das altitudes elipsoidais (DENNIS e GÉRARD, 2004).

Com relação aos modelos mensais, uma importante observação é que nos meses de maio e outubro de 2012, março, agosto e setembro de 2013, fevereiro, julho e dezembro de 2014 e junho de 2015, não foram disponibilizados modelos mensais do GRACE. Segundo Ries (2017), este fato

é resultado do descarregamento das baterias do satélite, que não suportaram operações científicas durante esses meses. Além disso, por ocasião do desenvolvimento desta pesquisa, para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2015 o ICGEM não havia disponibilizado os dados para o modelo do CSR RL05.

4.4 Cálculo das Altitudes Ortométricas

O relacionamento entre as componentes altimétricas, com caráter geométrico (altitudes elipsoidais – h) e físico (altitudes ortométricas – H), se dá como mostra a equação (4). Neste trabalho, a aproximação dos valores mensais das altitudes ortométricas dos pontos foram determinados pela diferença da altitude elipsoidal com a altitude geoidal (N):

$$H \approx h - N \quad (4)$$

4.5 Comparação entre os dados GRACE e GNSS

Neste sentido foram gerados gráficos das séries temporais de altitudes, para comparação entre as altitudes elipsoidais e as altitudes ortométricas. Das séries temporais foram obtidas as taxas de variação anual, com a determinação da reta de regressão (tendência) linear.

Foram determinados os valores das correlações entre as séries temporais de altitudes ortométricas (calculadas a partir da altitude geoidal obtida por diferentes modelos e centros de processamento) e as séries temporais de altitudes elipsoidais (obtidas do posicionamento GNSS). Também foram determinados os coeficientes de correlação entre as séries temporais de altitudes elipsoidais e as séries temporais de altitudes geoidais (funcional derivada dos modelos mensais). Em ambos os casos foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson.

4.5.1 Coeficiente de correlação linear

O coeficiente de correlação linear entre duas variáveis, X e Y , é comumente denominado de coeficiente de correlação linear de Pearson, também conhecido como Coeficiente de Correlação do Momento Produto.

A correlação é estimada em função da covariância entre X e Y , descrevendo assim a dependência linear entre elas, X é uma variável normalmente distribuída, com desvio padrão (σ_X), e Y variável também normalmente distribuída com desvio padrão (σ_Y). A equação (5) mostra como é feito o cálculo do coeficiente de correlação linear (ρ) (CHEN e POPOVICH, 2002):

$$\rho = \frac{COV(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (5)$$

Onde a covariância $COV(X, Y)$ é uma medida para exprimir a correlação de duas variáveis, a dependência entre as componentes, conforme a equação (6):

$$COV(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{(x_i - \mu_X)(y_i - \mu_Y)\} \quad (6)$$

Na equação (6), (n) é o número de observações, (μ_X) a média da variável X e (μ_Y) sendo a média da variável Y . Já os valores de σ_X e σ_Y são calculados conforme as equações (7) e (8):

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2}{n}} \quad (7)$$

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_Y)^2}{n}} \quad (8)$$

4.5.2 Reta de tendência – Regressão Linear

A análise de regressão linear busca representar as dispersões linearmente existentes de modelos matemáticos que relacionam o comportamento entre uma variável dependente com uma ou mais variáveis independentes; assim como, para estimar os parâmetros do comportamento sistemático entre as mesmas (CONOVER e IMAN, 1982).

Os modelos de regressão linear simples são funções matemáticas que são ajustadas para relacionar as variáveis X e Y . A variável X é a variável independente da equação enquanto Y é a variável dependente das variações de X . O modelo de regressão é chamado de simples quando envolve uma relação causal entre duas variáveis. Para o ajustamento da reta de regressão, tem-se a função afim, representada na equação (9) (CHEN e POPOVICH, 2002):

$$Y = aX + b \quad (9)$$

O coeficiente angular a e o coeficiente linear b são determinados de acordo com as equações (10) e (11), onde: (x) são os valores independentes da função e (y) são os valores dependentes e (n) o número de observações dos pares (x, y) :

$$a = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (10)$$

$$b = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2} \quad (11)$$

4.5.3 Valores das correlações lineares

A Tabela 1 apresenta os valores das correlações entre as séries temporais das altitudes elipsoidais e as séries temporais das altitudes ortométricas obtidas com os modelos dos diferentes centros de processamento e seus respectivos desenvolvimentos nos graus 60, 90 e 96. A análise destas correlações permite avaliar a compatibilidade dos resultados referentes aos modelos gerados pelos três diferentes centros (CSR, JPL e GFZ); além disso, permite avaliar em qual grau de desenvolvimento dos modelos ocorrem as melhores correlações.

4.5.4 Taxa de Variação Anual

De modo geral, a taxa da variação média anual das altitudes, se dá pela razão da diferença da função altitude mensal final $f(v)$ e inicial $f(u)$ pelo tempo médio anual. No caso desta pesquisa, taxa das altitudes elipsoidal e ortométrica, em relação ao período considerado. Na equação (12), considera-se que a função $f(u)$ e $f(v)$ são os valores das altitudes elipsoidais ou altitudes ortométricas e (a, b) são os meses iniciais e finais:

$$\frac{f(v) - f(u)}{(v - u)/12} \quad (12)$$

5 Resultados e Discursões

Os resultados aqui apresentados buscam analisar os diferentes modelos mensais do geopotencial provenientes da missão GRACE, cujas funcionais (altitude geoidal) são obtidas por meio do ICGEM, na avaliação do comportamento temporal da componente vertical (coordenada altimétrica) em pontos pertencentes à RBMC.

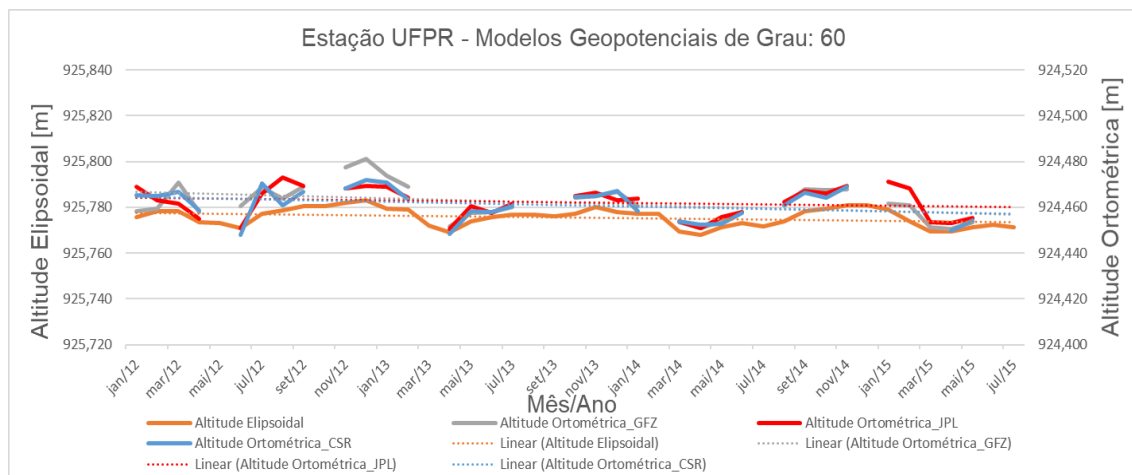
5.1 Gráficos e Tabelas da Variação Temporal das Altitudes

A geração de gráficos para a análise da variação temporal compreendeu o período de janeiro de 2012 até julho de 2015. Os gráficos mostram a comparação das séries temporais da altitude elipsoidal com as altitudes ortométricas geradas a partir da missão GRACE, no eixo vertical são apresentados os valores das altitudes e no eixo horizontal a época.

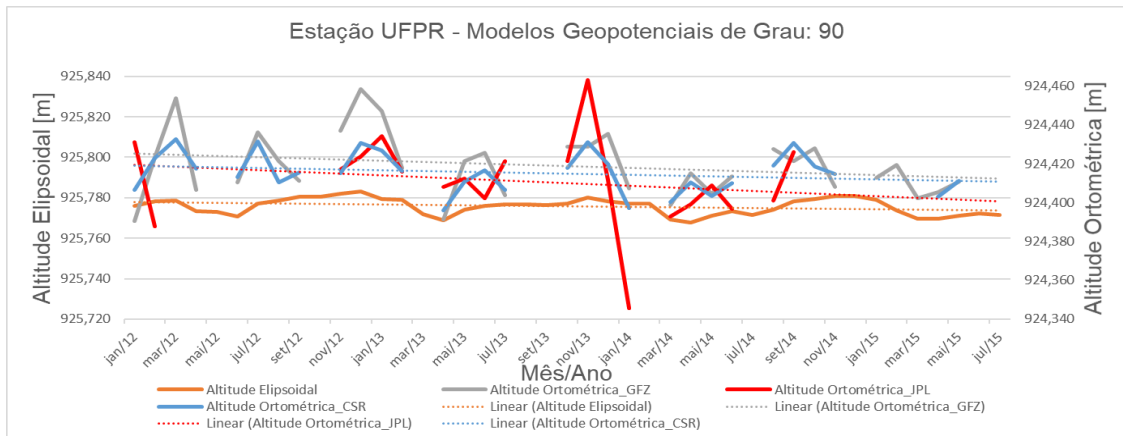
As variações que ocorrem nas altitudes elipsoidais ou nas altitudes ortométricas ao longo do tempo fornecem um indicativo de soerguimento ou de subsidência da crosta. Existem uma série de processos que contribuem para este movimento da crosta, distribuição de massas, deformações da Terra sólida, ciclo hidrológico, entre outros, porém a análise destes processos foge ao escopo deste trabalho.

Fig. 3 – Variação temporal das altitudes elipsoidais e ortométricas

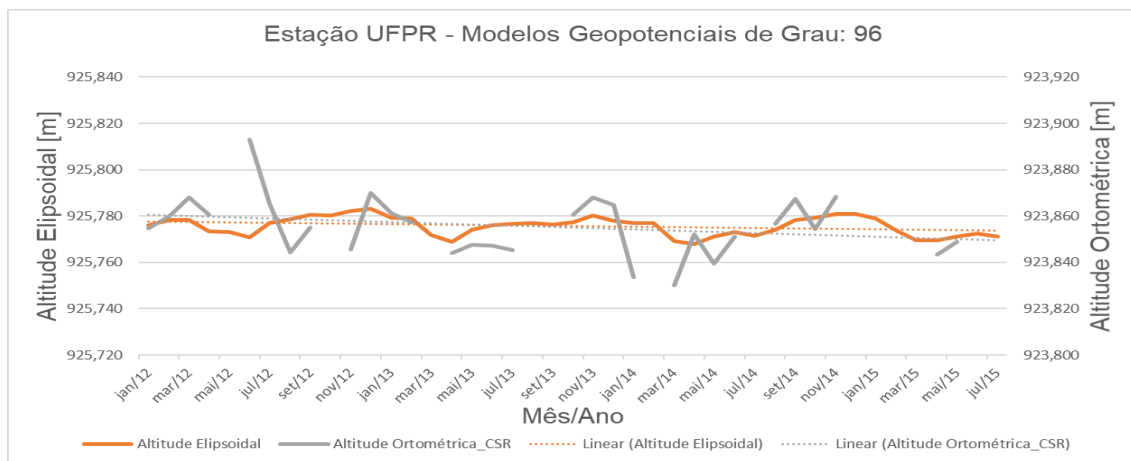
(a) altitudes ortométricas obtidas por modelos desenvolvidos até grau 60. (b) altitudes ortométricas obtidas por modelos desenvolvidos até grau 90. (c) altitudes ortométricas obtidas por modelo desenvolvido até grau 96.



(a)



(b)



(c)

Fonte: elaborada pelo autor

Um exemplo é apresentado na figura 3, que corresponde à estação UFPR. Os gráficos (a), (b) e (c), que correspondem aos diferentes graus de desenvolvimento dos modelos utilizados, apresentam indicativos de subsidência da crosta tanto quando se analisa a altitude elipsoidal, como quando se analisa os valores de altitude ortométrica. Nos gráficos foram também representadas as retas de tendência, da altitude elipsoidal e das altitudes ortométricas obtidas a partir dos modelos mensais do geopotencial do CRS, GFZ e do JPL.

Da Tabela 1, observa-se que para os modelos do geopotencial desenvolvidos até grau 60, têm-se as melhores correlações, provavelmente porque, conforme indicado anteriormente a partir do grau 60 ocorre um aumento do erro de comissão dos modelos. As duas únicas exceções ocorrem para os modelos do GFZ, cujo desenvolvimento até grau 90 gerou uma correlação ligeiramente melhor do que o desenvolvido até o grau 60 para as estações BAVC (correlação de 0,65 em grau 60 e de 0,67 em grau 90) e NEIA (correlação de 0,97 em grau 60 e de 0,99 para grau 90).

TABELA 1 – Valores das correlações entre as altitudes elipsoidais e os valores das altitudes ortométricas com base nos modelos geopotenciais DO CSR, GFZ e JPL COM GRAUS: 60, 90 e 96.

VALORES DAS CORRELAÇÕES DAS ESTAÇÕES RBMC							
Correlação entre as séries temporais de Altitudes Elipsoidais e Altitudes Ortométricas							
MODELOS	GNSS-CSR_60	GNSS-GFZ_60	GNSS-JPL_60	GNSS-CSR_90	GNSS-GFZ_90	GNSS-JPL_90	GNSS-CSR_96
BAVC	0,87	0,65	0,86	0,71	0,67	0,55	0,69
BRAZ	0,97	0,92	0,97	0,71	0,75	0,53	0,64
CRAT	0,96	0,91	0,95	0,77	0,65	0,66	0,59
CUIB	0,94	0,89	0,94	0,70	0,69	0,67	0,66
IMBT	0,91	0,89	0,74	0,45	0,52	0,44	0,40
IMPZ	0,97	0,96	0,97	0,84	0,87	0,84	0,71
NAUS	0,99	0,97	0,99	0,95	0,93	0,95	0,93
NEIA	0,99	0,97	0,99	0,97	0,99	0,94	0,96
ONRJ	0,98	0,95	0,98	0,80	0,83	0,68	0,90
POAL	0,84	0,54	0,70	0,31	0,40	0,48	0,43
PRGU	0,88	0,85	0,93	0,78	0,47	0,31	0,66
PRMA	0,85	0,80	0,88	0,60	0,43	0,46	0,51
RECF	0,90	0,80	0,89	0,30	0,69	0,20	0,32
RIOD	0,97	0,92	0,98	0,65	0,75	0,54	0,82
SCCH	0,75	0,56	0,58	0,07	0,04	0,42	0,19
SCLA	0,80	0,66	0,80	0,36	0,55	0,11	0,33
SMAR	0,92	0,82	0,76	0,62	0,24	0,28	0,49
UFPR	0,90	0,89	0,87	0,60	0,60	0,36	0,30

Fonte: elaborada pelo autor.

Desta forma pode-se dizer que 89% das estações analisadas com o modelo do GFZ possui no grau 60 uma maior correlação entre altitudes

elipsoidais e ortométricas do que com o modelo desenvolvido até o grau 90. Em relação aos modelos do CSR e JPL, todas as estações têm no grau 60 a melhor correlação entre as altitudes

Com os resultados apresentados na tabela 1 também é possível realizar, para cada grau de desenvolvimento que foi utilizado na geração dos modelos geopotenciais, uma comparação da correlação das altitudes entre os três centros de processamento. Nos modelos do geopotencial gerados para o grau 60, o CSR RL05 tem onze estações com melhor correlação, o JPL RL05 gera sete estações com a melhor correlação e o GFZ Release-05 com nenhuma estação com melhor correlação. Já para o grau 90, o GFZ RL05 tem o maior número de correlações mais fortes com nove estações, o CSR RL05 teve sete estações com a melhor correlação, e o JPL RL05 teve duas estações com melhor correlação.

Os valores altos de correlação entre as séries temporais de altitudes elipsoidais e ortométricas, indicam que o comportamento do geóide não sofre variação significativa nestas estações. Ou seja, que o acompanhamento temporal das altitudes elipsoidais com GNSS traz uma boa indicação do que acontece com a coordenada altimétrica (ou vertical) dos pontos ao longo do tempo.

A Tabela 2 apresenta as correlações entre as séries temporais de altitudes elipsoidais, vindas do posicionamento GNSS, e as séries temporais de altitudes geoidais, provenientes dos modelos mensais. Nesta tabela é possível observar que grande parte dos valores das correlações são negativos e que na maioria das estações os valores estão compreendidos entre $[-0,5; 0,5]$, o que indica que as correlações são fracas. O contrário acontece para duas estações, IMPZ e NAUS, que apresentam valores menores que $-0,5$ nas correlações entre as altitudes elipsoidais e geoidais, uma situação que indica uma forte correlação negativa.

De forma geral, os dados apresentados na TABELA 2 confirmam os resultados da TABELA 1, em que sendo os valores das correlações das altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas mais fortes e entre os valores

das altitudes elipsoidais e altitudes geoidais mais fracas, mostram que o comportamento do geóide nestas estações não tende a sofrer grande variação. Isto é esperado, pois os modelos do geopotencial refletem o efeito associado da distribuição de massas de todo o planeta, e dada sua resolução espacial não conseguem detectar variações regionais ou locais de curto comprimento de onda. Já estas variações regionais ou locais são facilmente detectadas nas séries temporais GNSS.

Tabela 2 – Valores das correlações entre as altitudes elipsoidais e os valores das altitudes geoidais com base nos modelos geopotenciais do CSR, GFZ e JPL COM GRAUS: 60, 90 e 96.

VALORES DAS CORRELAÇÕES DAS ESTAÇÕES RBMC							
Correlação entre as séries temporais de Altitudes Elipsoidais e Altitudes Geoidais							
MODELOS	GNSS-CSR_60	GNSS-GFZ_60	GNSS-JPL_60	GNSS-CSR_90	GNSS-GFZ_90	GNSS-JPL_90	GNSS-CSR_96
BAVC	-0,38	-0,39	-0,40	-0,46	-0,27	-0,32	-0,48
BRAZ	-0,71	-0,52	-0,72	-0,14	-0,26	-0,16	-0,18
CRAT	-0,54	-0,46	-0,53	-0,31	-0,23	-0,32	-0,10
CUIB	-0,62	-0,50	-0,67	-0,11	-0,19	-0,25	-0,18
IMBT	-0,27	-0,47	-0,05	-0,07	-0,26	-0,21	-0,03
IMPZ	-0,80	-0,82	-0,82	-0,53	-0,62	-0,57	-0,40
NAUS	-0,91	-0,76	-0,88	-0,75	-0,64	-0,67	-0,67
NEIA	0,07	-0,16	0,24	0,04	-0,26	-0,19	0,12
ONRJ	-0,40	0,09	-0,51	-0,05	0,10	0,09	-0,47
POAL	-0,06	0,07	0,03	-0,03	-0,09	-0,25	-0,19
PRGU	-0,30	-0,45	-0,58	-0,36	-0,05	-0,08	-0,37
PRMA	-0,19	-0,23	-0,15	0,04	0,08	0,15	-0,02
RECF	0,12	-0,39	-0,48	0,19	-0,35	0,08	0,20
RIOD	-0,40	0,01	-0,63	0,06	0,17	0,20	-0,29
SCCH	-0,10	-0,11	-0,12	0,20	0,22	-0,24	0,09
SCLA	-0,16	-0,11	-0,19	-0,03	-0,30	0,15	-0,03
SMAR	0,43	0,38	0,34	-0,15	0,43	0,17	0,17
UFPR	-0,53	-0,61	-0,42	-0,21	-0,39	-0,18	0,04

Fonte: elaborada pelo autor.

5.2 Taxa de Variação das altitudes

A Tabela 3 indica a variação anual, em milímetros, das altitudes elipsoidais e ortométricas para as estações analisadas, levando-se em consideração os diferentes centros de processamento e graus de

desenvolvimento dos modelos. Das estações analisadas, NEIA e ONRJ tiveram variações anuais maiores que 10 mm.

Tabela. 3 – Valores das taxas das variações milimétricas anuais das altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas com base nos modelos geopotenciais do CSR, GFZ e JPL COM GRAUS: 60, 90 e 96.

Estação	Altitude Elipsoidal	Variação das Altitudes Ortométricas (mm/ano)						
	Variação (mm/ano)	CSR			GFZ		JPL	
		60	90	96	60	90	60	90
BAVC	0,7	1,0	3,9	-4,8	-2,5	-2,2	1,0	-1,2
BRAZ	4,1	6,8	4,8	5,5	3,8	2,7	5,6	7,3
CRAT	0,5	0,3	0,1	-0,6	-1,3	-2,3	1,3	-1,4
CUIB	2,4	1,4	0,6	0,6	-0,9	-2,6	1,2	-5,3
IMBT	-2,9	-3,6	-2,4	-2,8	-4,2	-8,1	-2,4	-8,7
IMPZ	-3,9	-3,4	-2,8	-2,8	-5,5	-5,4	-4,4	-5,8
NAUS	4,4	2,4	3,1	6,0	1,6	0,5	4,4	-3,7
NEIA	-11,0	-12,0	-11,0	-10,0	-13,0	-15,0	-11,0	-8,0
ONRJ	10,8	12,3	11,9	15,0	10,1	10,0	12,3	11,4
POAL	0,5	-0,8	-3,4	-1,6	-2,6	2,2	-1,9	1,2
PRGU	-2,7	-3,7	-4,3	-3,1	-5,7	-4,6	-4,9	-2,8
PRMA	2,5	1,5	0,5	2,2	-1,4	-1,3	0,9	0,9
RECF	-2,6	-2,3	-2,3	-1,0	-4,4	-4,4	-3,9	-2,3
RIOD	7,1	8,5	7,9	10,8	6,5	6,4	8,8	6,8
SCCH	-0,2	-1,3	-0,6	-1,3	-3,4	-5,5	-3,1	-10,1
SCLA	-0,2	-1,5	-2,7	-2,9	-2,9	0,8	-1,7	5,7
SMAR	4,9	3,9	6,2	3,9	2,6	-2,2	2,3	5,0
UFPR	-1,2	-2,1	-2,3	-3,1	-2,9	-3,7	-1,1	-5,7

Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação aos resultados fornecidos pelos modelos para um mesmo grau de desenvolvimento, pode-se observar que sete estações (BAVC, CRAT, IMBT, IMPZ, NAUS, NEIA e UFPR) têm valores de diferença menores do que o milímetro quando comparadas as taxas de variação da altitude elipsoidal e da altitude ortométrica obtido pelo centro de processamento JPL RL05 de grau 60, o que compreende 38,9% das estações utilizadas na pesquisa. E para os modelos gerados para o JPL RL05 grau 90, as taxas de variação são bastante próximas (diferença < 1mm) em seis estações (ONRJ, POAL, PRGU, RECF, RIOD e SMAR), o que equivale a 33,3% das estações.

Em relação ao CSR RL05 de grau 96, as diferenças entre as taxas de variação da altitude ortométrica e elipsoidal é menor do que o milímetro para três estações (IMBT, PRGU e PRMA). Logo 16,67% das estações. Com esta análise, tem-se um indicativo de que os modelos geopotenciais gerados pelo centro de processamento do JPL tende a ter uma variação anual da altitude ortométrica mais próximas a variação anual da altitude elipsoidal.

Na comparação entre as altitudes ortométricas dos diferentes modelos globais do geopotencial e para o mesmo grau de desenvolvimento, foram verificados que: os modelos que foram desenvolvidos até o grau 60 apresentaram taxa de variação anual aproximada entre os centros de processamento CSR e GFZ, para as estações (IMBT, NAUS, e UFPR), entre os centros de processamento CSR e JPL, para as estações (BAVC, CUIB, ONRJ, PRMA, RIOD e SCLA) e entre os centros de processamento GFZ e JPL, para as estações (POAL, PRGU, RECF, SCCH e SMAR). E para os modelos que foram desenvolvidos até o grau 90, foram obtidas taxa de variação anual similar somente entre os centros de processamento CSR e JPL, para as estações (ONRJ, PRMA e RECF), entre os centros de processamento CSR e GFZ, para a estação (PRGU) e entre GFZ e JPL para as estações (CRAT, IMBT, IMPZ e RIOD).

Ainda referente às taxas de variação anual da altitude ortométrica, algumas estações tiveram comportamentos distintos, quando se leva em consideração o mesmo grau de desenvolvimento do modelo, porém em relação aos diferentes centros de processamento. Por exemplo, para os modelos globais do geopotencial desenvolvido até o grau 60, as estações (BAVC, CRAT, CUIB e PRMA) tiveram no modelo GFZ, valores das taxas anuais negativas, enquanto para os outros modelos (CSR e JPL) os valores das taxas anuais foram positivos. O mesmo foi observado para os MGGs desenvolvidos até o grau 90, por exemplo: na estação BAVC o modelo CSR gerou uma variação positiva enquanto os outros geraram variações negativas, o mesmo aconteceu com as estações CRAT e CUIB; na estação NAUS o modelo JPL gerou uma variação negativa enquanto os outros geraram variações positivas; na estação

POAL o modelo CSR gerou uma variação negativa enquanto os outros geraram variações positivas, o mesmo ocorreu na estação SCLA; já nas estações PRMA e SMAR o modelo GFZ gerou uma variação negativa enquanto os outros geraram variações positivas.

6 Considerações Finais

Foram utilizados modelos mensais do geopotencial provenientes de três diferentes centros de processamento JPL, CSR e GFZ, disponibilizados por meio do ICGEM para o período que compreende Janeiro de 2012 até Julho de 2015 e coordenadas geodésicas semanais de 18 estações da RBMC para o mesmo período. Com base nestas informações foram geradas séries temporais de altitude elipsoidal bem como de altitudes ortométricas. Para as altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas foram analisadas as correlações das séries temporais, assim como as taxas de variação anual.

As melhores correlações entre altitudes elipsoidais e ortométricas, ocorreram quando, no cálculo das altitudes ortométricas foram utilizadas as altitudes geoidais derivadas dos modelos mensais do geopotencial desenvolvidos até grau 60, isso reflete a influência dos erros de comissão (incertezas nas determinações dos coeficientes de Stokes) nos graus maiores de desenvolvimento.

Em relação à análise das variações anuais das altitudes elipsoidais e ortométricas, os valores obtidos pelo centro de processamento JPL até o grau e ordem 60 e JPL grau e ordem 90, foram os melhores se comparados com os modelos gerados pelos outros centros de processamento e comparados com os mesmos graus, o que compreende 38,9% e 33,3% das estações respectivamente. As análises das variações das altitudes para o modelo global do geopotencial CSR desenvolvido até o grau 96, mostrou uma ocorrência idêntica em três das dezoito estações de trabalho (IMBT, PRGU e PRMA). Logo 16,67% das estações.

Foi observado que, comparações de altitude ortométrica obtidas a partir dos valores das altitudes geoidais, estas provenientes dos modelos do geopotencial derivados dos centros de processamento CSR, GFZ e JPL, para algumas estações analisadas, apresentaram diferentes reações quanto à taxa de variação anual. Nestes casos, foram vistas que para uma mesma estação e para o mesmo grau de desenvolvimento, enquanto um determinado centro de processamento apresentava variação anual positiva na altitude ortométrica, os outros centros de processamento apresentaram variação anual negativa

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, ao programa de pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, e ao Instituto e os Centros de Processamento que disponibilizam acesso aos dados para a realização desta pesquisa: IBGE, JPL, CSR e GFZ.

Referências

- ALVES COSTA, S. M.; LIMA, M. A. A.; MOURA JUNIOR, N. J.; ABREU, M. A.; DA SILVA, A. L.; FORTES, L. P. S. RBMC em tempo real, via NTRIP, e seus benefícios nos levantamentos RTK e DGPS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2., 2008, Recife. **Simpósio...** Recife: 2008.
- ALVES COSTA, S. M.; DE MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. **Boletim de Ciencias Geodesicas**, Curitiba, v. 18, n. 2, 2012. pp. 262–281.
- ARDALAN, A. A.; KARIMI, R.; POUTANEN, M. A bias-free geodetic boundary value problem approach to height datum unification. **Journal of Geodesy**, v. 84, n. 2, 2010. pp. 123–134.

- BALMINO, G. Gravity Field Recovery From GRACE: Unique aspects of the high precision inter-satellite data and analysis methods. **Space Science Reviews**, v. 108, 2002. pp. 47–54.
- BARTHELMES, F. **Definition of Functionals of the Geopotential and Their Calculation from Spherical Harmonic Models**. Potsdam: German Research Centre for Geosciences, Revised Edition, Scientific Technical Report STR09/02, Revised Edition. 2013. p. 36,
- BETTADPUR, S. **GRACE 327-720 (CSR-GR-03-02) Gravity Recovery and Climate Experiment**. Austin, Texas, GRACE Product Specification Document. 2012. p. 77.
- BOMFORD, G. **Geodesy**. 3th ed. Oxford: Oxford University Press, 1971.
- BURŠA, M.; KENYON, S.; KOUBA, J.; SÍMA, Z.; VATRT, V.; VÍTEK, V.; VOJTÍSKOVÁ, M. The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system. **J Geodesy**, v. 81, 2006. pp. 103–110.
- CAZENAVE, A.; CHEN, J. Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 298, n. 3–4, 2010. pp. 263–274.
- CHAMBERS, D. P.; BONIN, J. A. Evaluation of Release-05 GRACE time-variable gravity coefficients over the ocean. **Ocean Science**. v. 8, n. 5, 2012. p. 859-868.
- CHEN, P. Y.; POPOVICH, P. M. **Correlation: parametric and nonparametric measures**. London: Sage, 2002. 95p
- CSR: **GRACE – Gravity Recovery and Climate Experiment - Science Data Products**. Site <<http://www2.csr.utexas.edu/grace/asdp.html>>. Acessado em fevereiro de 2017.
- CONOVER, W. J.; IMAN, R. L. **Introduction to Modern Business Statistics**. New York: John Wiley, 1982.
- DE FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; FAGGION, P. L. Modelagem do potencial anômalo no datum Vertical Brasileiro Visando sua nova definição. **Boletim de Ciências Geodesicas**, Curitiba, v. 13, n. 2, 2007. pp. 395–419.
- DE FREITAS, S. R. C.; FERREIRA, V. G.; PALMEIRO, A. S.; DE CARVALHO, J. L. B.; DA SILVA, L. F. Analysis of the Geopotential Anomalous Component at

- Brazilian Vertical Datum Region Based on the Imarui Lagoon System. In: MERTIKAS, S. P. **Gravity, Geoid and Earth Observation**. v. 135. Crete, Grécia: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 321–327.
- DE FREITAS, S. R. C. SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. **Revista Cartográfica**, v. 91, 2015. pp. 75–92.
- DENNIS, D. M. C.; GÉRARD, P. **IERS Conventions (2003)**. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2004. p. 127.
- DREWES, H.; SÀNCHEZ, L.; BLITZKOW, D.; DE FREITAS, S. R. C. Scientific foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: DREWES, H.; DODSON, A. L.; SOUTO FORTES, L. P.; SÀNCHEZ, L.; SANDOVAL, P. **Vertical Reference Systems**. v. 124. Cartagena, Colombia: Springer Berlin Heidelberg, 2002. pp. 297-301.
- FEATHERSTONE, W. E. Expected Contributions of Dedicated Satellite Gravity Field Missions to Regional Geoid Determination with some Examples from Australia. **Journal of Geospatial Engineering**, v. 4, n. 1, 2002. pp. 1–19.
- GEMAEL, C. **Introdução à Geodésia Física**. 2.ed. Curitiba: Editora UFPR. 2012. 302p.
- HAO, M.; FREYMUELLER, J. T.; WANG, Q.; CUI, D.; QIN, S. Vertical crustal movement around the southeastern Tibetan Plateau constrained by GPS and GRACE data. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 437, 2016. pp. 1–8.
- IBGE: **Geociências – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) – Centro de Combinação - Resultados**. Site <https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas_comb/resultados.shtm>. Acessado em fevereiro de 2017.
- IHDE, J.; SÀNCHEZ, L. A unified global height reference system as a basis for IGGOS. **Journal of Geodynamics**, v. 40, n. 4–5, 2005. pp. 400–413.
- LOBIANCO, M. C. B. **Análise dos dados da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS 2006 a 2010**. Relatório Técnico, Rio de Janeiro: IBGE, 2011. 424p.
- NICACIO JUNIOR, E. L., DALAZOANA, R. Análises de extractos de Modelos Globales de Geopotencial Generados punto-a-punto a partir de una Aplicación Standalone. In: **Simposio SIRGAS 2016, Quito, Equador. Apresentação oral**. Quito: Instituto Geografico Militar, 2016.

- RANGELOVA, E.; WAL, W. VAN DER; SIDERIS, M. G. How Significant is the Dynamic Component of the North American Vertical Datum? **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, 2012. pp. 281–289.
- RIES, J. C. **GRACE data** [Mensagem pessoal]. Mensagem Recebida por: <antonio.cagido@gmail.com>. 31 jan 2017.
- RUMMEL, R. Global unification of height systems and GOCE. In: SIDERIS, M. G. **Gravity, geoid and geodynamics**. v. 123. Canadá: Springer Berlin Heidelberg, 2000. pp 15–20.
- SÀNCHEZ, L. Definition and Realisation of the SIRGAS Vertical Reference System within a Globally Unified Height System. In: TREGONING, P.; RIZOS, C. **Dynamic Planet: Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic**. v. 130. Berlin: Springer Berlin Heidelberg. v. 130, 2007 pp. 638–645.
- SÀNCHEZ, J. L. C.; DE FREITAS, S. R. C. Estudo do Sistema Vertical de Referência do Equador no Contexto da Unificação do Datum Vertical. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 2, 2016. pp. 248–264.
- SÀNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal Deformation and Surface Kinematics after the 2010 Earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, 2016. p 1-23.
- SCHMIDT, R. FLECHTNER, F.; MEYER, U.; REIGBER, C.; BARTHELMES, F.; FORSTE, C.; STUBENVOLL, R.; KONIG, R.; NEUMAYER, K. H.; SHOW LESS, S. Z. Static and Time-Variable Gravity from GRACE Mission Data. In: FLURY, J. RUMMEL, R.; REIGBER, C.; ROTHACHER, M.; BOEDECKER, G.; SCHREIBER, U. **Observation of the Earth System from Space**. Munich and Potsdam: Springer, 2006. pp. 115-129.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. 2nd ed. New-York: Walter de Gruyter. 2003. 589p.
- SIRGAS: **Home – Rede SIRGAS-CON – Estações – Lista de Estações**. Site <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/stations/station-list/>>. Acessado em fevereiro de 2018a.
- SIRGAS: **Home – Rede SIRGAS-CON – Coordenadas – Soluções semanais semilivres**. Site <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/coordinates/loosely-constrained/>>. Acessado em fevereiro de 2018b.

- SIRGAS: **Home – Rede SIRGAS-CON – Coordenadas – Coordenadas semanais das estações SIRGAS-CON.** Site <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/coordinates/weekly-positions/>>. Acessado em fevereiro de 2018c.
- SUN, T.; FERREIRA, V. G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S. A. Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. **Water**, v. 8, n. 5, 2016. p. 213.
- TIWARI, V. M.; SRINIVAS, N.; SINGH, B. Hydrological changes and vertical crustal deformation in south India: Inference from GRACE, GPS and absolute gravity data. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 231, 2014. pp. 74–80.
- VAN DAM, T.; WAHR, J.; LAVALLÉE, D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 112, n. 3, 2007.
- VAN DER WAL, W. V.; RANGELOVA, E.; SIDERIS, M. G.; WU, P. Secular Geoid Rate from GRACE for Vertical Datum Modernization. In: MERTIKAS, S. P. **Gravity, Geoid and Earth Observation**. v. 135. Crete, Grécia: Springer Berlin Heidelberg, 2010. pp. 611-617.
- WAHR, J.; SWENSON, S.; VELICOGNA, I. Accuracy of GRACE mass estimates. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 6, 2006.