



**Análise do Potencial de Gravidade nas Estações da  
Rede Maregráfica Permanente para Geodésia Obtido com Diferentes Modelos Geoidais**  
Analysis of the Gravity Potential in the Stations of the  
Permanent Tide Gauge Network for Geodesy Obtained with Different Geoid Models

Valéria Cristina Silva<sup>1</sup> & Gabriel do Nascimento Guimarães<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Avenida Professor Almeida Prado, Travessa 2, nº83, prédio Engenharia Civil, Cidade Universitária, 05508-070. São Paulo, SP, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo.

Rod. LMG 746, km 01, s/n, bloco 1, Campus Monte Carmelo, 38500-000. Monte Carmelo, MG, Brasil

E-mails: vsilva2@usp.br; gabriel@ufu.br

Recebido em: 22/08/2018      Aprovado em: 23/10/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_605\\_613](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_605_613)

## Resumo

A fim de unificar o sistema de altitudes no país e atender as exigências em termos de acurácia da Geodésia moderna, a Associação Internacional de Geodésia coloca que as altitudes devem ser baseadas em uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra com o potencial  $W_0$ . Este trabalho objetiva calcular o potencial nas estações maregráficas pertencentes à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), utilizando seus níveis de referência, modelos globais do geopotencial, como os modelos GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 e o modelo brasileiro oficial do geóide, MAPGEO2015. Para determinar o valor de  $W_0$ , a Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) também foi calculada. Os resultados comparados com a literatura mostraram valores entre -0,01 a 0,45 m para a TNMM e valores de potencial para as estações em torno do valor de calculado globalmente de 62636853, 4m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>.

**Palavras-chave:** Geopotencial; Geodésia; Topografia do Nível Médio do Mar; Datum Vertical

## Abstract

In order to unify the height system in the country and support the requirements in terms of the accuracy of modern Geodesy, the International Association of Geodesy (IAG) has imposed that the heights must be based on an equipotential surface of the Earth gravity field with  $W_0$  potential. This paper aims to calculate the potential of the tide gauge from the Permanent Tide Gauge Network for Geodesy (RPMG), using its reference elements, global geopotential models such as the GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 and the official Brazilian geoid model, MAPGEO2015. To determine the value of  $W_0$ , the Sea Surface Topography (SST) was also computed. The results were compared with the literature and values were obtained between -0.01 and 0.45 m for the SST and the potential values for the tide gauges around of the value computed globally of 62636853.4 m<sup>2</sup>s<sup>-2</sup>.

**Keywords:** Geodesy; Sea Surface Topography; Vertical Datum

## 1 Introdução

Nas Ciências Geodésicas os avanços tecnológicos têm contribuído para o aperfeiçoamento das técnicas de posicionamento de satélites. A última década foi chamada de década das missões espaciais gravitacionais, uma vez que três satélites foram lançados com objetivos de mapear o comportamento do campo de gravidade terrestre. Os resultados dessas missões contribuíram para o desenvolvimento de modelos do geopotencial, capazes de determinar o campo de gravidade com alta precisão.

No Brasil, o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A rede altimétrica brasileira é composta pelos *data* Imbituba e Santana, fundamentados em observações do nível do mar local. As estações utilizadas como referência, estão localizadas ao longo da costa em diferentes posições geográficas e apresentam valores distintos para a chamada Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM), definida como a separação do nível médio do mar e o geoide (Sánchez, 2009). A falta da informação da TNMM na determinação da altitude, juntamente com demais inconsistências durante o ajustamento da rede altimétrica, propagam incertezas que ocasionam a não conexão entre os *data* verticais. Além disso, o IBGE é responsável por um conjunto de estações que compõem a Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia (RMPG) e monitoram continuamente o nível médio do mar.

Altitudes referenciadas em medidas maregráficas podem alcançar discrepâncias de até 2 m em escala global. Além disso, erros de propagação do nivelamento associadas a diferentes reduções gravimétricas podem ocasionar incertezas métricas dos sistemas. Em se tratando de intercâmbios de dados em projetos internacionais, estes não são possíveis, função da incompatibilidade de dados (Sánchez, 2007).

Face ao exposto, a IAG, responsável por pesquisas de Geodésia em âmbito global, publicou em 2015 a Resolução N. 1 que determina a definição e realização de um Sistema de Referência Internacional de Altitudes (IHRs – *International Height Reference System*). Para tanto, é necessário adotar um elemento padrão de referência vertical que corresponda a uma

superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra e descreva o fluxo da água (IAG, 2015). Tal parâmetro refere-se ao valor do potencial  $W_0$ , calculado globalmente baseado no modelo mais recente do campo de gravidade da Terra e de modelos de superfície do mar.

Métodos de cálculo do potencial estão sendo estudados, porém, ainda que se determine o valor de  $W_p$  em estações litorâneas, faz-se necessário definir a TNMM de maneira consistente. As diferenças de altitude nas estações maregráficas, calculadas pelo potencial  $W_0$  ou não, ocorrem devido a discrepâncias na topografia do mar (Ihde *et al.*, 2017). Uma das dificuldades nesse âmbito é a perda de resolução dos modelos derivados da altimetria por satélites na interface oceano/continente. Além disso, as atuais metodologias empregadas para o cálculo de exigem dados gravimétricos homogêneos em um raio mínimo de 100 km; informações ainda inexistentes no oceano.

Três métodos distintos viabiliza a avaliação de  $W_p$  a partir da TNMM: 1) combinando registro das médias do nível do mar com modelos geopotenciais; 2) altimetria por radar a bordo de satélites e modelos geopotenciais; 3) modelos oceânicos (Hayden *et al.*, 2012). O IBGE visa determinar a TNMM por meio da altimetria por satélites e modelos geopotenciais; contudo, devido a questões orçamentárias, o órgão ainda não conseguiu realizar tal tarefa (IBGE, 2013). Neste contexto, métodos alternativos que envolvem informações gratuitas e disponíveis, como registros do nível médio do mar e altura geoidal, se mostraram eficazes e podem ser empregados para estimar a TNMM e estabelecer altitudes físicas.

O trabalho vislumbrou calcular a TNMM e estabelecer o valor do para cada estação maregráfica por meio dos seus respectivos níveis de referências e dos modelos do geopotencial mais recentes. Os resultados são comparados e discutidos, assim como, os novos valores de altitude com a inserção da TNMM.

## 2 Fundamentação Teórica

### 2.1 A Rede Maregráfica

A Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia foi proposta em 1996 pela Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Universidade Federal do Rio de

Janeiro (UFRJ) ao IBGE, devido à necessidade de estabelecer um referencial altimétrico permanente que atendesse todo território nacional (IBGE, 2013). A sua materialização se iniciou em 2001 e atualmente conta com cinco estações ativas (Figura 1).

## 2.2 Topografia do Nível Médio do Mar

Ao passo que estudos sobre o comportamento dos oceanos foram desenvolvidos, notou-se que, mesmo considerando longas séries de observações nas Estações Maregráficas (EMs), o Nível Médio do Mar (NMM) ainda não correspondia ao geoide (Luz, 2008), e, tais desvios poderiam ter como causa movimentos das correntes oceânicas e a diferença de expansão volumétrica em meio às águas tropicais e polares (Vaníček & Krakiwsky, 1986).

A nomenclatura da topografia do mar é referida na literatura de diversas formas. Como TNMM (IBGE, 2013), Topografia Oceânica (TO) (Lopes, 2006), Topografia Dinâmica (TD) (Lopes, 2010) e Topografia da Superfície do Mar, do inglês *Sea Surface Topography* (SST) (Hayden *et al.*, 2012; Torge, 2001). Ressalta-se que o cálculo TNMM envolve uma série

de fatores sujeitos a inexactidões, desse modo, o valor final é somente uma estimativa. Comumente, a sua aproximação é realizada recorrendo a altimetria por radar a bordo de satélites, acompanhado da mensuração de fenômenos como a temperatura, salinidade, observações de registros maregráficos, velocidade das correntezas dentre outros (Lopes, 2010).

## 2.3 Número Geopotencial

O número geopotencial é a base para determinar a componente vertical com sentido físico visto que tem relação com a superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra.  $C$  é dado pela diferença de potencial entre dois pontos na superfície conforme a equação (1).

$$C_p = W_o - W_p = \sum_{i=0}^p g_i \cdot dh_i \quad (1)$$

O número do geopotencial  $C$  pode ser calculado como a diferença do potencial de gravidade na Terra real em um ponto de interesse  $W_p$  e a superfície de

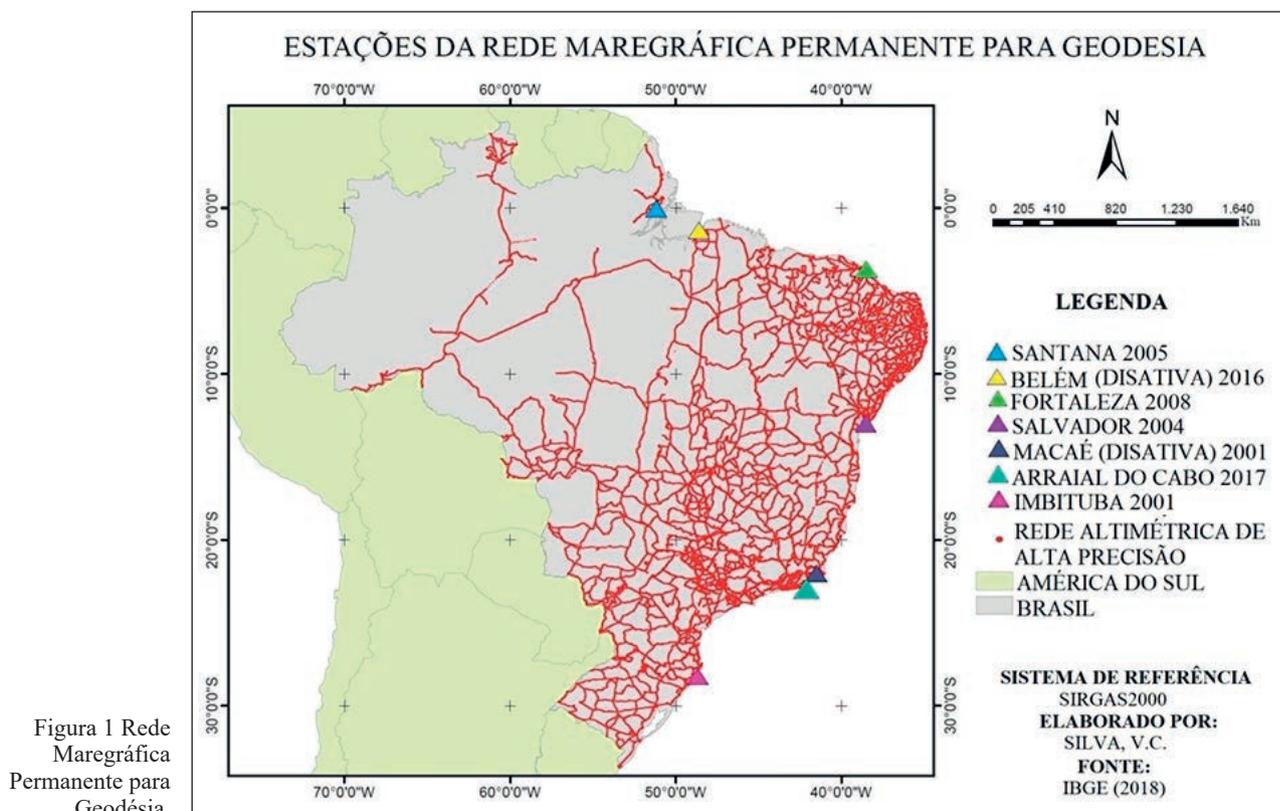


Figura 1 Rede Maregráfica Permanente para Geodésia.

referência  $W_0$ . Pelo somatório,  $C$  é a soma de todas as diferenças de altitudes  $dh_i$  multiplicado por um valor de gravidade  $g_1$ . A unidade de medida de  $C$  é unidades de geopotencial (GPU) ou  $kgal \times m$ . Em todos os pontos em uma dada superfície equipotencial,  $C$  é constante, porém não tem dimensão de distância (Jekeli, 2000). Assim, para medi-lo em unidades de comprimento, basta dividi-lo por um valor de gravidade do ponto a determinar, conforme a equação (2).

$$H = \frac{C}{g} \quad (2)$$

### 3 Material e Métodos

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo corresponde às estações maregráficas de Salvador, Fortaleza, Macaé, Imituba apresentado na Figura 1.

#### 3.2 Método

O método utilizado por este trabalho recorre ao primeiro método realizado por Hayden *et al.* (2012), consistindo na seleção de EMs pertencentes à RMPG, na seleção de modelos geopotenciais locais e globais e na utilização dos níveis de referência das próprias estações divulgadas pelo IBGE e pela DHN. A partir da relação dos níveis fornecidos pelo IBGE e da avaliação geométrica dada por Hayden *et al.* (2012) tem-se a Figura 2 que representa como foi calculado a TNMM.

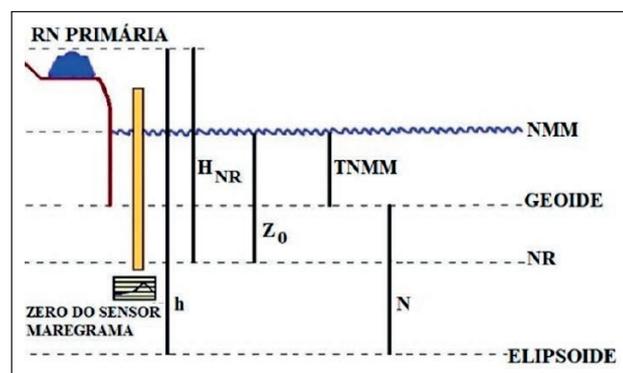


Figura 2 Estimativa Geométrica da TNMM. (Adaptado de IBGE 2016; Hayden, *et al.*, 2012).

As referências representadas são: superfície elipsoidal, zero do sensor maregrama, Nível de Redução (NR), superfície geoidal, NMM local,

Referência de Nível (RN) primária. Os elementos utilizados para o cálculo da TNMM são:  $h$  (altitude elipsoidal da RN),  $H_{NR}$  (altura da RN acima NR),  $Z_0$  (altura do NMM acima do NR),  $N$  (altura geoidal). A TNMM é calculada pela equação (3) (Hayden *et al.*, 2012).

$$TNMM = \vec{h} - \vec{N} - \vec{H}_{NR} + \vec{Z}_0 \quad (3)$$

Grandezas associadas ao potencial não devem ser calculadas desconsiderando os efeitos permanentes e periódicos da atração lunisolar, para isso a TNMM deve ser transformada do sistema livre de maré para o sistema de maré médio ou zero. A equação (4) foi aplicada para a correção do sistema *tide free* para *mean tide* visto que os parâmetros estão associados à posição de estações, conforme recomenda a convenção do IERS 2010 (Petit & Luzum, 2010; Hayden *et al.*, 2012).

$$TNMM_{tf} = TNMM_{mt} + 0,68 [9,9 - (29,6 \text{ sen}^2 \varphi)] 0,01 \quad (4)$$

Para o potencial do ponto de interesse  $W_p$  ser expresso em termos da TNMM, é necessário realizar a conversão para a diferença de potencial, a qual consiste na subtração do potencial  $W_0$ , computado globalmente pela TNMM, conforme a equação (5) a seguir (Hayden *et al.*, 2012).

$$W_p = W_0 - [(\vec{h} - \vec{N} - \vec{H}_{NR} + \vec{Z}_0) \gamma_p] \quad (5)$$

Onde,  $\gamma_p$  refere-se à gravidade normal, calculada aproximadamente pela equação (6) da Somigliana (MORITZ, 1980).

$$\gamma = \frac{a \gamma_e \cos^2 \Phi + b \gamma_p \text{ sen}^2 \Phi}{\sqrt{a \gamma_e \cos^2 \Phi + b \gamma_p \text{ sen}^2 \Phi}} \quad (6)$$

Tem-se na equação, a gravidade normal no Equador ( $\gamma_e$ ) (e nos polos ( $\gamma_p$ ), a latitude geodésica do ponto de interesse ( $\Phi$ ), e o valor do semieixo maior (a) e o semieixo menor (b) do elipsoide de referência.

#### 3.3 Níveis de Referência

A Figura 3 ilustra os elementos utilizados do IBGE e da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para calcular a TNMM.

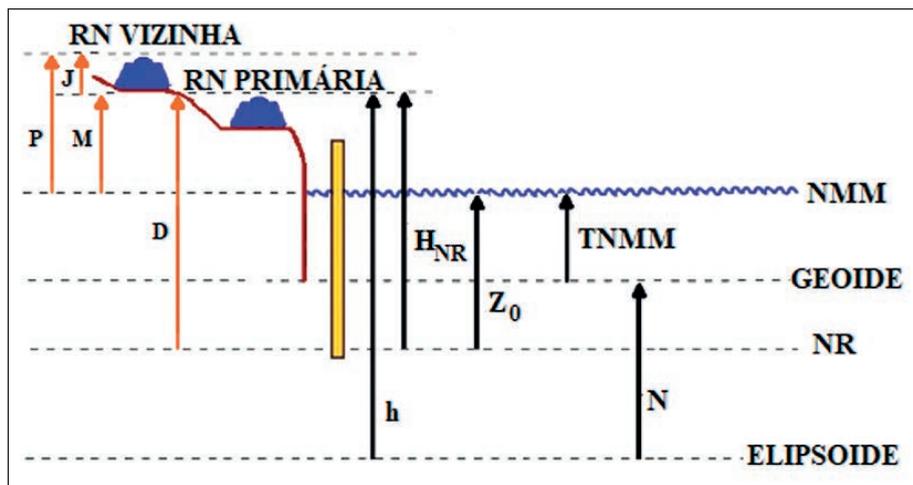


Figura 3 Elementos de Referência das EMs. (Adaptado de IBGE 2013; Hayden *et al.* 2012).

Os quatro vetores a esquerda exibidos na Figura 4, são os níveis de referência utilizados do IBGE (2015). Onde: J (desnível entre as referências de nível primária e vizinha); M (altura da RN primária acima do nível médio local); P (altura da RN vizinha acima do nível médio local); D (altura da RN primária acima do nível de redução).

O Banco de Dados Geodésicos (BDG) somente disponibiliza a altitude elipsoidal das RNs primárias das estações de Macaé e Salvador. Logo, para se determinar o  $h$  (Tabela 1) das demais estações, recorreu-se a equação (7), utilizando a altitude ortométrica, presente no relatório das mesmas.

$$h_1 - h_2 = (H_1 - H_2) + (N_1 - N_2) \quad (7)$$

Para obter  $h$  da RN 4336-A, foi acrescentado o desnível de 0,062 m determinado pelo IBGE entre as mesmas, na altitude elipsoidal da RN 9320-P que foi calculada utilizando a RN 4332-A (Tabela 1).

EMs	h (m)	RNs
Fortaleza	-5,3663	9320P/2791N/4336A
Salvador	-8,6610	3640A
Macaé	-3,4080	3086U
Imbituba	3,3539	3012X/3012U

Tabela 1 Altitude elipsoidal das RNs primárias das EMs.

O elemento de referência  $H_{NR}$ , nomeado como  $D$  pelo IBGE, refere à altura elipsoidal da RN primária acima do NR. Esse parâmetro é disponibilizado pela DHN, monitorado e atualizado pelo IBGE2015. Os

valores correspondentes a esse elemento estão na Tabela 2. A estação de Macaé não apresenta o dado referente a alguns elementos que a compõe devido uma mudança na régua linimétrica (DHN, 2013). Para determinar o nível D, utilizou-se o valor da tábua de marés referente à estação de Macaé, disponibilizado pela DHN. De acordo com os níveis geométricos das EMs apresentados na Figura 6, pode-se determinar por meio da equação (8), relacionando outros níveis

$$Z_0 = D - (P - J) \quad (8)$$

Efetuada estas relações acima obteve-se o parâmetro  $Z_0$  (Tabela 2).

EMs	(m)	(m)
Fortaleza	4,7890	1,5568
Salvador	3,2650	1,2921
Macaé	4,1970	1,0433
Imbituba	2,4060	0,4672

Tabela 2 Altura da RN primária acima do nível de redução e altura entre o NR e o NMM local. (IBGE, 2016 e DHN, 2013).

As marés estão sujeitas a efeitos dinâmicos causados movimentos relativos de corpos celestes como a Lua, o Sol e a Terra. Um dos importantes movimentos que afetam as marés são dois tipos de precessões da Lua. A primeira é o ciclo nodal lunar que tem duração de 18,61 anos e o perigeu lunar que dura 8,85 anos (Haigh; Eliot & Pattiaracthi, 2011). Para eliminar tais constituintes periódicos é necessário 19 anos de observações maregráficas ou múltiplos aproximada-

mente. No entanto, as estações da RMPG possuem até o momento menos de quinze anos processado, contendo ainda falhas durante alguns períodos.

### 3.4 Altura Geoidais

O elemento referência  $N$  exposto na equação (7) refere-se à ondulação geoidal ou o valor do geóide. Esse pode ser fornecido pelos modelos globais do geopotencial e por modelos nacionais como o MAPGEO2015.

O cálculo do  $N$  dos modelos globais do geopotencial foi feito na plataforma ICGEM pela URL <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>> na aba *Calculation Service*. Foram escolhidos os modelos EIGEN-6C4 (Yilmaz *et al.*, 2016), GECO (Gillardoni *et al.*, 2016), XGM2016 (Pail *et al.*, 2016) classificados como sendo *Longtime Models*, por conter as mais completas e recentes soluções das missões GOCE, GRACE, LAGEOS. A função para o cálculo é o *geoid*, o sistema de referência utilizado foi o WGS84, e selecionou-se o termo de grau zero para adequar o geóide ao seu geocentro. A fim de atender os parâmetros do modelo do MAPGEO2015, o qual foi calculado no sistema de livre de maré, os cálculos dos modelos geopotenciais globais foram feitos com o mesmo sistema. Na aba de seleção de grid foram inseridas as coordenadas da RN primária de cada estação, e desta forma calculou-se o  $N$  para os modelos EINGEN-6C4, GECO, XGM2016 (Tabela 3). O cálculo do  $N$ , apresentado na Tabela 3 para o modelo oficial brasileiro do geóide foi feito a partir do aplicativo disponibilizado pelo IBGE no endereço ([https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo\\_geoidal.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm)).

EMs	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016	MAPGEO2015
Fortaleza	-8,6384	-8,6753	-8,6870	-8,9400
Salvador	-10,7211	-10,7065	-10,7368	-10,9400
Macaé	-6,3496	-6,4981	-6,4310	-6,7700
Imbituba	1,6849	1,6690	1,7019	1,2500

Tabela 3 Valor de  $N$  dos modelos globais do geopotencial para as EMs (metros).

O valor da gravidade normal foi obtido a partir das coordenadas de latitudes das EMs fornecidas pelo relatório das RNs primárias, e as constantes e parâmetros que constam em Moritz (1980 p. 131). A Tabela 4 exibe os valores calculados para a gravidade normal.

EMs	G Normal (mGal)
Fortaleza	978.054,347
Salvador	978.292,972
Macaé	978.782,015
Imbituba	979.189,090

Tabela 4 Valores obtidos da gravidade normal nas EMs.

O fluxograma da Figura 4 exibe a metodologia executada.

## 4 Resultados e Discussões

Os valores obtidos para a TNMM calculados utilizando os modelos GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 e MAPGEO2015 para as EMs no sistema de maré médio, estão na Tabela 5.

EMs	MAPGEO2015	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
Fortaleza	0,273	0,382	0,419	0,430
Salvador	0,229	0,420	0,405	0,435
Macaé	0,112	0,101	0,250	0,183
Imbituba	0,053	0,028	0,044	0,011

Tabela 5 TNMM das EMs calculada por diferentes modelos (valor em metros).

Na estação de Imbituba, onde é adotado o referencial zero de altitude, a TNMM foi de 0,011m para o modelo global do geopotencial XGM2016, enquanto que para MAPGEO2015 a TNMM foi de aproximadamente 0,053 m. As estações de Fortaleza e Salvador apresentaram discrepâncias superiores, 0,16m e 0,20m respectivamente.

É importante ressaltar que os modelos globais do geopotencial e o modelo oficial do geóide não apresentam compatibilidade nos dados. Enquanto que os modelos globais são fundamentados em uma série de parâmetros que envolvem gravimetria por satélites e dados terrestres de todo o globo, o MAPGEO2015 apesar de conter dados da solução EIGEN-6C4 e dados gravimétricos do continente sul americano, não apresenta informações gravimétricas no oceano, o que pode causar inconsistência dos dados na região litorânea. Entretanto, existem diversos estudos que comprovam a consistência do mesmo comparado às redes de nivelamento e conexões GNSS (Blitzkow *et al.*, 2016; Ferraz *et al.*, 2017).

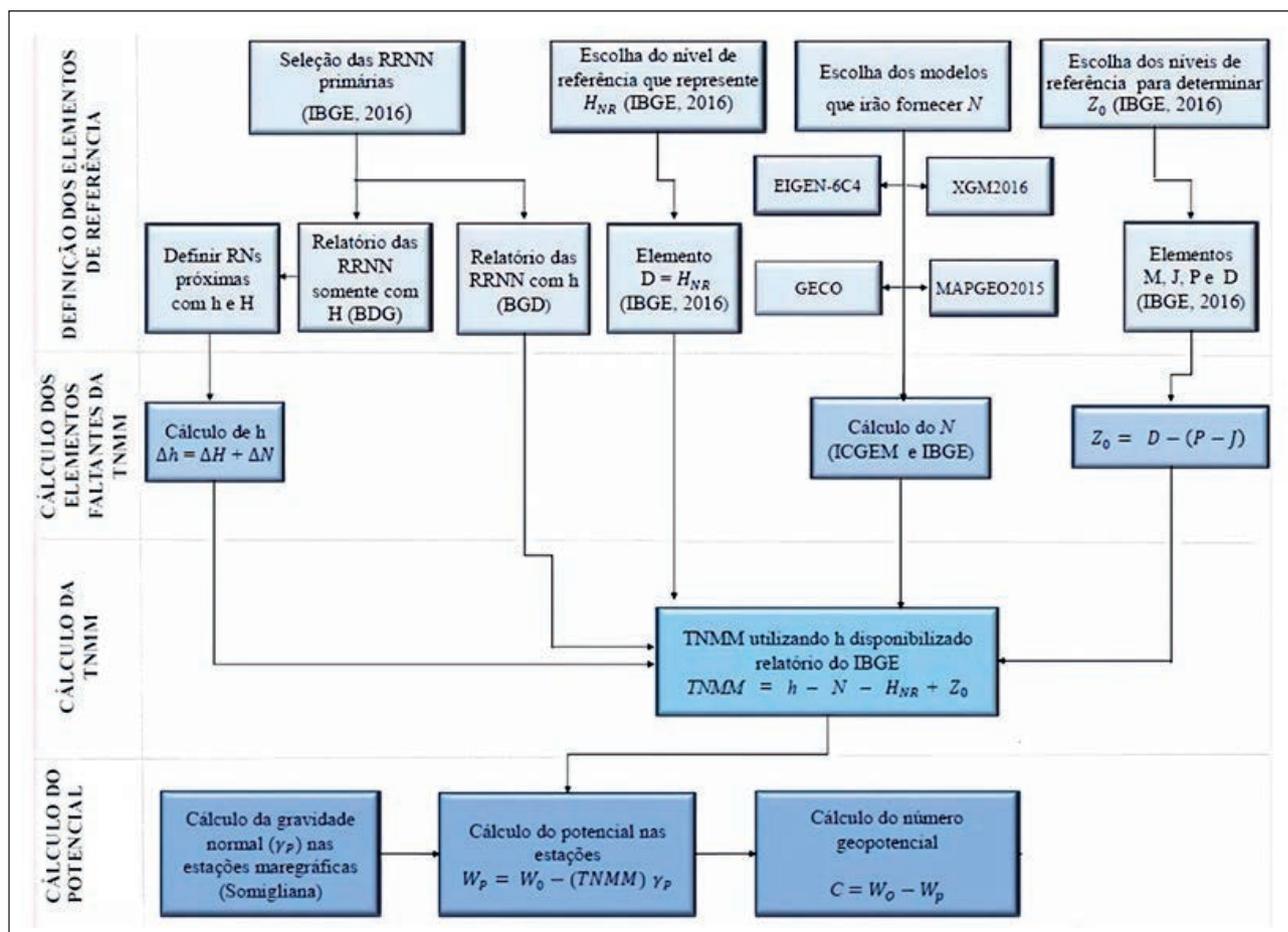


Figura 4 Processos realizados para o cálculo do potencial e altitudes normais.

Comparando o grau e ordem dos modelos analisados, a solução EIGEN-6C4 presente no modelo brasileiro oficial do geóide possui somente grau e ordem 200. No entanto, em sua composição pode haver mais informações gravimétricas terrestres que melhor modela o Brasil que os modelos globais. Percebe-se por meio da Figura 5 a discrepância entre os dados da TNMM para cada modelo. Veja que a diferença é superior para o modelo brasileiro oficial do geóide, sobretudo nas estações ao nordeste do país.

As diferenças inerentes às observações estão associadas na determinação do parâmetro  $N$  visto que as discrepâncias apresentadas são as mesmas comparando os valores de TNMM e  $N$  entre os modelos. As diferenças obtidas em metros, tanto entre os valores de  $N$  e valores de TNMM, estão na Tabela 6.

A partir dos valores de gravidade normal, e de TNMM, foi calculado o potencial em cada estação

EMs	Fortaleza	Salvador	Macaé	Imbituba
GECO / EIGEN-6C4	-0,0369	0,0146	-0,1485	-0,0159
GECO / XGM2016	-0,0486	-0,0157	-0,0814	0,0171
EIGEN-6C4 / XGM2016	-0,0117	-0,0304	0,0671	0,0329
GECO / MAPGEO2015	0,1084	0,1911	-0,0104	-0,0249
EIGEN-6C4 / MAPGEO2015	0,1453	0,1765	0,1381	-0,0090
XGM2016 / MAPGEO2015	0,1570	0,2068	0,0710	-0,0419

Tabela 6 Comparação dos valores de  $N$  e TNMM nas EMs de estudo (valores em metros).

maregráfica em  $m^2/s^2$  (Tabela 7). Assim como os valores obtidos de TNMM, os valores do do modelo MAPGEO2015 se diferenciaram dos outros modelos, chegando à discrepância máxima de  $2,02 m^2/s^2$  em Salvador com o modelo XGM2016. O comportamento

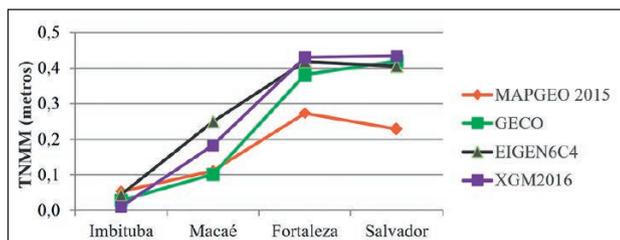


Figura 5 TNMM no sistema maré médio obtida com diferentes alturas geoidais.

entre as demais se encontra similar a TNMM, com diferenças inferiores para as estações de Macaé e Imbituba quando analisado todos os modelos.

EMs	Wp MAPGEO	Wp GECO	Wp EIGEN	Wp XGM2016
Fortaleza	62636850,73	62636849,67	62636849,31	62636849,19
Salvador	62636851,16	62636849,29	62636849,44	62636849,14
Macaé	62636852,31	62636852,41	62636850,95	62636851,61
Imbituba	62636852,88	62636853,13	62636852,97	62636853,29

Tabela 7  $W_p$  nas EMs ( $m^2/s^2$ ).

Tocho & Vergos (2016) buscaram calcular o valor do potencial médio local para a Argentina utilizando duas metodologias, onde uma envolve a combinação da altitude ortométrica de Helmert, valores do geopotencial e modelo de superfície derivada do EGM 2008 utilizando o ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, e a outra recorrendo à combinação de nivelamento e GNSS com ondulação geoidal derivada do modelo EGM2008, e obtiveram valores entre 62636852,8 a 62636854,4  $m^2/s^2$  Hayden (2013), determinou o potencial para o Canadá utilizando a TNMM determinada pela equação (1), e obteve para todas EMs da região do oceano atlântico após uma série de filtragens que minimizaram erros, a diferença máxima de 1,13  $m^2/s^2$  entre os modelos DIR\_r3+EGM2008 e GOCO03s.

A partir da Tabela 7, percebe-se que comparando os valores de potencial de todas as EMs de acordo com o modelo, o MAPGEO2015 foi o que apresentou uma amplitude menor entre as estações, enquanto que os modelos globais chegaram a ter a discrepância de 4,1  $m^2/s^2$  entre as estações de Fortaleza e Imbituba com o modelo XGM2016. Por meio do potencial e a gravidade normal, obteve os seguintes valores para o número geopotencial, associando o valor de  $W_0$  (Tabela 8).

EMs	MAPGEO2015	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
Fortaleza	2,67	3,73	4,09	4,21
Salvador	2,24	4,11	3,96	4,26
Macaé	1,09	0,99	2,45	1,79
Imbituba	0,52	0,27	0,43	0,11

Tabela 8 Números Geopotenciais das EMs de acordo com modelos do geóide.

## 5 Considerações Finais

Apesar da escassez de pesquisas para fins comparativos devido à dificuldade metodológica em se estimar a TNMM com precisão, o estudo se demonstrou satisfatório uma vez que os valores determinados de  $W_p$  se mantiveram próximo ao valor de  $W_0$  para todos os modelos.

A TNMM, assim como o valor do potencial, se mostraram dependentes da altura geoidal. Sendo assim, é essencial a escolha de modelos de alta resolução e que apresentem dados gravimétricos consistentes para a área de estudo. Os valores de  $N$  apresentaram variações em torno de 0,4 m entre os modelos globais do geopotencial e o MAPGEO2015. Tais discrepâncias estão associadas às heterogeneidades das composições e metodologias dos modelos. Para todos os cálculos efetuados, as diferenças superiores estão presentes nas estações de Fortaleza e Salvador, em torno de 0,2 m para a TNMM. Uma das razões para a ocorrência desta diferença pode estar relacionado aos vazios gravimétricos na região Nordeste comparado a outras regiões do país.

Recomenda-se ao IBGE o cálculo e divulgação dos desvios padrão de cada elemento associado aos níveis de referência das estações maregráficas a fim de quantificar as incertezas dos cálculos apresentados. Além disso, é primordial que as RRNN caracterizadas como primárias e secundárias responsáveis pela referência geométrica da RMPG, contenham o relatório com informações completas no BDG.

## 6 Referências

- Blitzkow, D.; Matos, A.C.O.; Machado, W.C.; Nunes, M.A.; Lengruher, N.V.; Xavier, E.M.L. & Fortes, L.P.S. 2015. MAPGEO2015: O novo modelo de ondulação

- geoidal do Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(10):1873-1884.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Descrição de Estação Maregráfica. 2013. Disponível em: < <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoesmaregraficas/estacao-mare.html>> Acesso em: 15 maio 2017.
- Ferraz, R.S.; Souza, G.; Trescastro, F.; Torres, S.A.; Souza, S.F.; Consentino, K.B. & Fortes, A.R. 2017. Análise da avaliação absoluta de modelos de ondulação geoidal e do geopotencial no município de Porto Alegre- RS. In: Anais do SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA II JORNADAS LUSÓFONAS - CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA, 4, Anais - CTIG2017. Presidente Prudente, UNESP, p.390-396.
- Gilardoni, 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.
- Haigh, I.; Eliot, M. & Pattiaratchi, C. 2011. Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels. *Journal of Geophysical Research - Oceans*, 116:1-16.
- Hayden, T.; Rangelova, E.; Sideris, M.G. & Véronneau, M. 2012. Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE Gravity Field models. *Journal of Geodetic Science*, 2(4):290-301.
- Hayden, T.T. 2013. *Geopotential of the Geoid-Based North America Vertical Datum*. Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta. Master of Science, 197p.
- IBGE. 2013. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012. Disponível em: < [ftp://geof-tp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2013\\_GRRV.pdf](ftp://geof-tp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf)> Acesso em: 05 maio 2017.
- IBGE. 2016. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG2001/2015. Disponível em: < [ftp://geof-tp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2015\\_GRRV.pdf](ftp://geof-tp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf)> Acesso em: 05 maio 2017.
- IBGE. 2017. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Banco de Dados Geodésicos. 2017. Acesso em: 20 ago. 2017.
- IBGE. 2018. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rede Maregráfica Permanente para Geodésia. Disponível em: < [https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default\\_rmpg\\_int.shtm?c=10](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm?c=10)> Acesso em: 20 jul. 2018.
- Ihde J.; Sánchez, L.; Barzaghi, R.; Drewes, H.; Foerste, C.; Gruber, T.; Liebsch, G.; Marti U.; Pail, R. & Sideris, M. 2017. Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHR). *Surveys in Geophysics*, 38(3):549-570.
- IAG. 2015. International Association of Geodesy (IAG). *IAG Resolution (No. 1) for definition and realization of an International Height Reference System (IHR)*. Prague, Czech Republic. Disponível em: < [https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf)> Acesso em: 06 jun. 2017.
- Jekeli, C. 2000. Heights, the Geopotential, and Vertical Datums. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science. Ohio State University. Ohio. Technical Report. Disponível em: < [http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/Heights\\_Jekeli.pdf](http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/Heights_Jekeli.pdf)> Acesso em: 05 maio, 2017.
- Lopes, B.A. 2006. *O Geóide Gravimétrico e o Nível Médio do Mar na Região do Datum Altimétrico Brasileiro: Um Estudo Comparativo*. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado, 97p.
- Lopes, B.A. 2010. *A utilização de modelos geoidais e altimetria por satélite no estudo das variabilidades no nível do mar e correntes geostroficas no Atlantico Sul e região da Confluência Brasil Malvinas*. Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo. Tese de Doutorado, 218 p.
- Luz, R.T. 2008. *Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Universidade Federal do Paraná, Tese de Doutorado, 179 p.
- Moritz, H. 1980. Advanced physical geodesy. *Bulletin Géodésique*, 54(3):395-407.
- Pail, R.; Fechner, T.; Barnes, D.; Factor, J.; Holmes, S.; Gruber, T. & Zingerle, P. 2016. Short note: the experimental gravity field model XGM2016. *Journal of Geodesy*, 92(10):1-9.
- Petit, G. & Luzum, B. 2010. IERS Conventions - IERS Technical Note 36. *Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*, p. 179.
- Sánchez, L. 2007. Definition and realization of the SIRGAS vertical reference system within a globally unified height system. *International Association of Geodesy Symposia*, 130:638-645.
- Sánchez, L. 2009. Strategy to Establish a Global Vertical Reference System. *International Association of Geodesy Symposia*, 134:273-278.
- Tocho, C. & Vergos, G.S. 2015. Estimation of the geopotential value for the Local Vertical Datum of Argentina using EGM2008 and GPS/Levelling data  $W_{OLVD}$ . *International Association of Geodesy Symposia*, 143:271-279.
- Torge, W. 2001. *Geodesy*. 3. ed. 432 p. Berlin, German.
- Vaniček, P. & Krakiwsky, E.J. 1986. *Geodesy: the Concepts*. 2. ed.,. Amsterdam. Elsevier. 697 p.
- Yilmaz, M.; Turgut, M.; Gullu, M. & Yilmaz, I. 2016. Evaluation of Recent Global Geopotential Models By Gns/Levelling. Data: Internal Aegean Region. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 1(1):18-23.