

# Ensaio da estimativa da topografia do nível médio do mar local em marégrafos da costa brasileira

Everton Gomes dos Santos<sup>\*a</sup>, Leonardo Castro de Oliveira<sup>b</sup>

<sup>a</sup>everton.santos@ibge.gov.br

<sup>b</sup>leonardo@ime.eb.br

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho, é indicar um procedimento para determinação da estimativa da Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) como insumo à definição moderna de um sistema vertical. A modelagem empregada foi baseada nas abordagens geométrica e oceanográfica, na qual são utilizadas observações do Nível Médio do Mar (NMM) provenientes de marégrafos. As principais etapas da modelagem foram: a determinação da posição geocêntrica dos marégrafos; o cálculo do NMM local; e o cálculo da altura geoidal. Os valores obtidos para os sítios de Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ apontam que a região não apresenta variações muito significativas. Os sítios de Imbituba-SC e Salvador-BA apresentam valores próximos entre si, apesar de possuírem peculiaridades importantes. O sítio de Fortaleza-CE não difere significativamente dos valores obtidos em outras pesquisas. A estratégia empregada apontou que os valores de TNMM para parte da costa brasileira são coerentes com outras abordagens. Esses resultados podem ser subsídios ao aprimoramento de referências verticais.

**ABSTRACT:** The objective of this work is to indicate a procedure for determining the estimate of the Sea Surface Topography (SSTop) as an input to the modern definition of a vertical system. The modeling used was based on geometric oceanographic and approaches, in which observations of Mean Sea Level (MSL) from tide gauges are used. The main steps of the modeling were: the determination of the geocentric position of the tide gauges; calculating the local MSL; and the calculation of the geoid height. The values obtained for the sites of Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ and Macaé-RJ indicate that the region does not present very significant variations. The Imbituba-SC and Salvador-BA sites have similar values despite having important peculiarities. The Fortaleza-CE site does not differ significantly from values obtained in other researches. The strategy employed indicated that the SSTop values for part of the Brazilian coast are consistent with other approaches. These results can be subsidies for the improvement of vertical references

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema vertical. Geóide. Nível médio do mar. Modelo Global do Geopotencial.

**KEYWORDS:** Height system. Geoid. Mean Sea Level. Global Geopotential Model.

## 1. Introdução

A definição clássica do geóide foi primeiramente explicitada por Gauss, em 1828, como sendo a referência para a representação geométrica (ou um modelo) da superfície terrestre. Posteriormente, em 1973, Listing chamou tal modelo de geóide (ou superfície geoidal da Terra). O geóide consiste em uma superfície equipotencial que mais se aproxima do nível médio não perturbado dos mares. A definição moderna reconhece que a superfície média dos oceanos não coincide com a superfície de nível do campo de gravidade terrestre [1]. Essa não coincidência se deve ao fato do Nível Médio do Mar (NMM) não ser estático. Isto é ocasionado pelo movimento das correntes

oceânicas e por outros efeitos quase estacionários [2], ou seja, não é uma superfície em equilíbrio com o campo de gravidade da Terra. Logo, existe uma diferença (ou separação) entre o NMM e o geóide conhecida como Topografia do Nível Médio do Mar – TNMM (do inglês *Sea Surface Topography – SSTop*) [3].

Esta diferença se dá pela interação de vários fenômenos físicos, como por exemplo, os meteorológicos e os oceanográficos, podendo ainda variar em função do tempo [4]. Quando comparado ao geóide, tal separação é da ordem de  $\pm 2$  m [5]. Isto posto, leva a conclusão de que cada ponto da costa, ou seja, cada marégrafo, está relacionado a um valor diferente de TNMM [6].

As redes geodésicas clássicas de muitos países, inclusive o Brasil, utilizaram, e ainda utilizam,

como referência *data* verticais definidos e realizados baseados em um, ou mais, valor (es) de NMM obtido (s) em determinado período e vinculado a uma época específica [7] supondo uma coincidência entre o NMM e o geóide.

No Brasil os dois *data* (sistemas) verticais, isto é, o *Datum* de Imbituba – SC, definido por observações de nível do mar no período de 1949 a 1957, e o *Datum* de Santana – AP, definido por observações de nível do mar no período de 1957 a 1958, foram baseados em observações maregráficas desconsideradas as variações temporais e espaciais do nível médio do mar e do movimento vertical da crosta [6].

A concepção moderna entende que a determinação de um sistema vertical deve ser a mais homogênea possível. Para tanto, requer uma infraestrutura geodésica complexa, onde é necessária a compatibilização de informações e metodologias que tenham padronização a nível global. Essa questão, no âmbito do continente americano, vem sendo discutida pelo Grupo de Trabalho III do SIRGAS (*Datum* Vertical) estabelecido em 1997 [8]. Vale ressaltar que outros grupos da comunidade científica têm coordenado esforços no que tange ao desenvolvimento de conhecimentos voltados ao aprimoramento da componente vertical [9]. Contudo, a citada infraestrutura depende do avanço da tecnologia em algumas áreas do conhecimento, além de estudos aplicados, a fim de tornar possível o objetivo de construir um sistema vertical unificado a nível global.

Nesse sentido, a *International Association of Geodesy* (IAG), por meio de sua resolução Nº. 1 de julho de 2015 [9], preconiza a adoção de uma superfície equipotencial do campo da gravidade com geopotencial  $W_0 = 62\,636\,853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  como superfície de referência que possibilitará a unificação dos diferentes sistemas altimétricos existentes. Evidentemente, a TNMM deve ser considerada na realização de tais sistemas.

Um subsídio fundamental à unificação de diferentes *data* locais é a combinação de observações do NMM, coletadas através de marégrafos, à TNMM, obtida por

meio de satélites altimétricos ou abordagens associadas a Modelos Globais do Geopotencial – MGGs.

O objetivo desse trabalho é indicar uma modelagem baseada nas abordagens geométrica e oceanográfica para determinação da estimativa da TNMM, em estações maregráficas na costa brasileira, como insumo às discussões sobre a definição moderna de um *datum* vertical.

## 2. Modelagem para determinação da estimativa da TNMM

A abordagem geométrica é o método que combina registros das médias do nível do mar com modelos geopotenciais, como proposto por [10] e revisitado por [11]. A solução para a estimativa da TNMM é dada pela Eq. (1), baseada em variáveis que compõem o sistema dos referenciais maregráficos. A modelagem apresentada será aplicada para parte dos marégrafos da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia - RMPG.

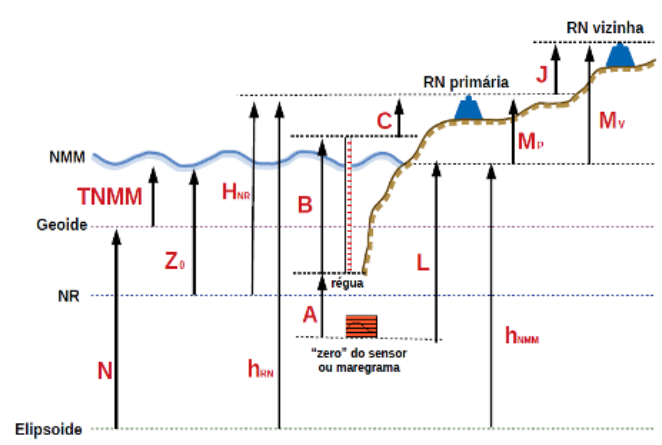
$$TNMM = h_{RN} - N - H_{NR} + Z_0 \quad (1)$$

Na Eq. (1) tem-se que  $h_{RN}$  é a altitude elipsoidal da Referência de Nível (RN) primária de um marégrafo,  $N$  é a altura geoidal fornecida pelos modelos do geopotencial ou pelos modelos geoidais,  $H_{NR}$  é a altura da RN acima do Nível de Redução (NR) – informada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação na ficha F 41 [12] – e  $Z_0$  a altura do nível do mar acima do NR. Caso se disponha da altura do NMM referida a um elipsóide ( $h_{NMM}$ ) a Eq. (1) pode ser reescrita na forma da abordagem oceanográfica [13]:

$$TNMM = h_{NMM} - N \quad (2)$$

A **figura 1** esquematiza os termos da Eq. (1) e as superfícies relacionadas a ela. Cabe destaque, dentre essas superfícies e elementos, respectivamente, o Nível de Redução (NR), referência a qual corresponde à média das menores marés de sizígia [14], e o “zero”

do sensor maregráfico, ponto de referência ao qual a observação maregráfica está vinculada.

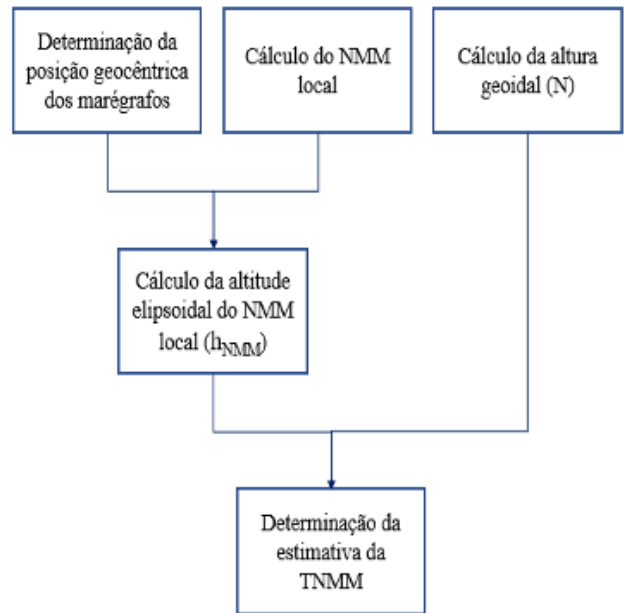


**Fig. 1** – Componentes do sistema para cálculo da estimativa da TNMM. Fonte: Adaptado de [10] e [16]

Para a devida leitura e compreensão da **figura 1**, a qual apresenta também as demais grandezas para vinculação da TNMM à RN primária, tem-se que:

- A - desnível entre os “zeros” dos marégrafos e da régua, resultante da aferição dos sensores obtido por meio do Teste Van de Castele [15];
- B - leitura nominal do pino/topo da régua;
- C - desnível do pino/topo da régua até a RN primária (nivelamento geométrico da régua);
- J - desnível entre as Referências de Nível (RRNN) primária e vizinha (obtido através do nivelamento geométrico científico do Controle Geodésico de Estações Maregráficas – CGEM [16]);
- L - Nível médio do mar local obtido das leituras do sensor maregráfico;
- M<sub>p</sub> e M<sub>v</sub> - altura da RN primária e vizinha acima do nível médio do mar local [16].

A **figura 2** apresenta o fluxograma da estratégia utilizada para a determinação da estimativa da TNMM que será detalhada nas próximas seções.



**Fig. 2** – Fluxograma para determinação do valor da TNMM

Foram selecionados seis sítios distribuídos ao longo da costa brasileira a fim de se ter uma melhor representatividade espacial do litoral brasileiro. Foram considerados ainda pontos importantes para estudos voltados ao acompanhamento das evoluções temporal e espacial dos *data* verticais brasileiros e suas relações com os demais níveis de referência utilizados na região costeira. São eles: Imbituba-SC, por ser o *Datum* que cobre a maior parte da Rede Altimétrica de Alta Precisão; Niterói-RJ; Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ, por estarem na porção da Rede Geodésica de Referência Costeira [17]; Salvador-BA e Fortaleza-CE, por se localizarem na Região Nordeste, complementando a disposição espacial. Além das razões explicitadas, os sítios de Imbituba-SC e de Fortaleza-CE são estações escolhidas para estudos sobre o *International Height Reference System/Frame – IHRS/IHRF* (ver [3]).

## 2.1 Determinação da posição geocêntrica dos marégrafos

A estratégia para determinação da posição geocêntrica dos marégrafos, materializados pelas RRNN primárias as quais os sensores e as régua de

maré estão vinculadas, foi baseada na metodologia apresentada por [18]. Foram selecionadas três RRNN pertencentes às sub-redes de cada marégrafo com estrutura de Dispositivo de Centragem Forçada (DCF), exceto para o sítio de Macaé, que não possui o citado dispositivo instalado. A **figura 3** apresenta um modelo de RN composta por DCF e realização do rastreamento GNSS com um suporte metálico de 10 cm (nesse caso não varia a altura da antena; no caso de Macaé varia).



**Fig. 3** – DCF implantado em um marco geodésico.

Um aspecto fundamental sobre o nivelamento no âmbito do CGEM, tanto dos DCFs quanto das demais estações geodésicas de controle, é que se tem alcançado erros de fechamento melhores que  $1mm\sqrt{D}_{km}$ , sendo D o comprimento de uma seção de nivelamento em quilômetros. Diante do exposto, a altitude elipsoidal estimada ( $h_A$ ), da RN primária do marégrafo, é dada pela Eq. (3):

$$h_A = h_B - \Delta J_{BA} \quad (3)$$

na qual  $h_B$  é a altitude elipsoidal da RN vizinha e  $\Delta J_{BA}$  o desnível ajustado entre os pontos A e B.

Os dados utilizados foram oriundos dos levantamentos *Global Navigation Satellite System* (GNSS), referentes a 4 sessões com duração de 6 horas de rastreamento a um intervalo de 15 segundos (ver [19]), e desníveis resultantes do CGEM do ano 2019, realizado pelo IBGE nos marégrafos da RMPG. No caso de Macaé foram utilizados os dados correspondentes do CGEM do ano 2015, uma vez que depois que cessaram as atividades desse marégrafo não se realizaram demais controles.

O processamento das observações GNSS foi realizado com o *software* Leica Infinity 3.1 no método relativo para a semana SIRGAS da época do levantamento. O elipsóide de referência foi o GRS80.

Em relação aos desníveis utilizados no cálculo, cabe informar que foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, no programa *Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data* (GHOST), com desvio padrão igual a  $1mm\sqrt{D}_{km}$ . Foi utilizado o conceito de maré permanente médio, logo, também foi necessário realizar a conversão das altitudes elipsoidais para o conceito de maré média, conforme apresentado por [20]. A **tabela 1** apresenta os valores da altitude elipsoidal estimada para cada marégrafo conforme a Eq. (3), bem como seu desvio padrão.

**Tab. 1** – Altitude elipsoidal estimada para cada sítio.

Marégrafo	Desnível nivelamento geométrico $\Delta J_{BA}$ (m)	Altitude elipsoidal calculada $h_B$ (m)	Altitude elipsoidal estimada $h_A$ (m)	Desvio padrão (m)
Niterói	0,450	-3,807	-4,257	0,006
Arraial do Cabo	-0,017	-2,973	-2,956	0,002
Macaé	0,257	-3,265	-3,522	0,001
Imbituba	5,950	9,253	3,0303	0,006
Salvador	0,676	-8,039	-8,716	0,002
Fortaleza	2,943	-2,582	-5,525	0,008

De maneira complementar foi realizado o cálculo da altura da RN primária acima do nível médio do mar local ( $M_p$ ). Para tanto foi utilizada a Eq. (4), que relaciona as componentes apresentadas na **figura 1**. Os resultados dos valores de MP para cada sítio estudado são mostrados na **tabela 2**.

$$M_p = A + B + C - L \quad (4)$$

**Tab. 2** – Altura elipsoidal da RN primária

Marégrafo	A (m)	B (m)	C (m)	L (m)	Mp (m)
Niterói	0,001	3,800	-0,224	1,908	1,669
Arraial do Cabo	-0,002	3,013	1,463	1,739	2,735
Macaé	0,161	0,313	1,498	1,341	3,331
Imbituba	0,998	2,016	0,487	1,984	1,607
Salvador	5,015	4,015	0,233	7,283	1,980
Fortaleza	3,257	6,030	0,264	6,339	3,212

## 2.2 Cálculo da altura geoidal

De acordo com [21], para a determinação da TNMM são mais adequados os modelos do tipo combinado, isto é, modelos que, além dos dados de satélite, têm em sua constituição dados de gravimetria terrestre, entre outras informações. O XGM2019e é um MGG do tipo combinado que trouxe em sua realização inovações importantes [22] e [23]. O Brasil, por meio do IBGE, contribuiu com um conjunto de dados de 1.970 pontos de observações GNSS/nivelamento para o XGM2019e. Essa medida proporcionou uma melhoria significativa nos valores de desvio padrão, sobretudo no Estado do Rio de Janeiro e de Santa Catarina, como relatado por [24].

Outra maneira de calcular a altura geoidal para o território brasileiro é por meio do MAPGEO2015, disponibilizado na página do IBGE (<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html?=&t=acesso-ao-produto>). No entanto, o citado modelo não apresenta compatibilidade de dados com os MGGs, pois estes são fundamentados em séries de parâmetros que envolvem, consistentemente, gravimetria por satélites e observações terrestres do globo inteiro, além de informações gravimétricas do oceano. Essas informações são fundamentais à consistência dos dados em regiões litorâneas, foco da presente pesquisa. Informações complementares sobre MAPGEO2015 podem ser encontradas em [25].

De posse da posição geocêntrica da referência de cada marégrafo constante nessa pesquisa, através do site do ICGEM (<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>) foi possível calcular a altura geoidal para cada um deles. O elipsóide de referência foi o GRS80, assim como foi feito na seção 2.1. O conceito de maré foi o médio. A adoção desse conceito para essa pesquisa foi baseada na recomendação da IAG na resolução Nº 1 de 2015, que se coaduna com o estabelecido para o IHR5. Não foi considerado o termo de grau zero. A função para o cálculo foi a *geoid*. Em relação ao grau e ordem foi utilizado até 2.190, máximo de desenvolvimento disponível até a data do cálculo. Por

fim, não foi utilizado o filtro gaussiano para não inserir suavização da superfície calculada. O cálculo da altura geoidal, para determinação da TNMM, foi realizado por meio do MGG XGM2019e [22]. Na **tabela 3** são apresentados os valores encontrados para as alturas geoidais, referentes a cada sítio dessa pesquisa, vinculadas às RRNN primárias de cada marégrafo.

Tab. 3 – Altura geoidal para cada sítio.

Marégrafo	RN primária	Altura geoidal (m)
Niterói	2994L	-5,57
Arraial do Cabo	2987P	-5,30
Macaé	3086U	-6,31
Imbituba	3012X	1,75
Salvador	3640A	-10,62
Fortaleza	4336A	-8,49

## 2.3 Cálculo do nível médio do mar local

A determinação dos níveis médios do mar locais foi executada de acordo com o descrito em [16]. Portanto, as ferramentas computacionais aplicadas a cada etapa de cálculo foram provenientes do pacote de *software* SLP 64 [26].

O período das observações para determinação do NMM em cada sítio pesquisado é variável conforme a data de instalação do marégrafo ou da possibilidade de recuperação dos dados. Desta maneira, o período limite para a maior parte das séries é 2019, excetuando apenas o marégrafo de Macaé que teve uma interrupção da coleta de dados em maio de 2015. Outro aspecto relevante é que o cálculo do NMM local não levou em consideração a correção de efeitos geodinâmicos. Frente a essa questão, as variações determinadas de NMM aqui utilizadas são relativas. Informações adicionais sobre essa questão podem ser encontradas em [27].

Uma vez obtidos os valores do NMM, estes precisam ser referenciados ao elipsóide a fim de satisfazer o cálculo da Eq. (2) Tendo em vista essa necessidade, por meio da Eq. (5), foram calculados os valores de  $h_{NMM}$ .

$$h_{NMM} = h_A + M_P \quad (5)$$

A **tabela 4** apresenta os valores do NMM para cada local contemplado na pesquisa e o período de observação, bem como os valores de altura do NMM referenciado ao elipsóide GRS80.

**Tab. 4** – Nível médio do mar para cada sítio.

Marégrafo	NMM (m)	$h_{NMM}$ (m)	Período de observação
Niterói	1,908	-5.926	2009-2019
Arraial do Cabo	1,739	-5.692	2009-2019
Macaé	1,341	-6.853	2001-2015
Imbituba	1,984	1.696	2001-2019
Salvador	7,283	-10.696	2004-2019
Fortaleza	6,339	-8.737	2008-2019

## 2.4 Determinação da estimativa da TNMM local

A Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) é a separação entre o NMM e o geóide, assim sua determinação pode ser obtida pela diferença entre o NMM referido a um elipsóide ( $h_{NMM}$ ) e a altura geoidal (N) proveniente de um MGG, Eq. (2) (apresentados na **tabela 3**). Para tanto é necessário que o NMM esteja referenciado ao mesmo elipsóide que as alturas geoidais.

A TNMM calculada foi referenciada às RRNN primárias de cada marégrafo. Dado que tais RRNN estão muito próximas aos sensores, menos de 3 m, assume-se, portanto, que a variação do gradiente geoidal não apresenta diferenças significativas. A **tabela 5** apresenta os valores estimados da TNMM referentes aos marégrafos desta pesquisa calculados por meio da Eq. (2).

**Tab. 5** – Topografia do nível médio do mar estimada para cada sítio.

Marégrafo	TNMM (m)
Niterói	-0,356
Arraial do Cabo	-0,395
Macaé	-0,538
Imbituba	-0,050
Salvador	-0,074
Fortaleza	-0,242

## 3. Análise dos resultados

Os sítios de Niterói, Arraial do Cabo e Macaé apresentam valores de TNMM compatíveis entre si, desta forma aponta que a TNMM na região não apresenta variações muito significativas. Observa-se que à medida que vai se deslocando no sentido sul-norte tais valores vão diminuindo gradativamente, indicando como se dá o comportamento do gradiente geoidal em relação ao NMM na região. No entanto, vale frisar que a heterogeneidade das séries temporais do nível do mar, das observações GNSS e dos nivelamentos também podem introduzir desvios importantes aos cálculos.

Os sítios de Imbituba e Salvador apresentam valores próximos de TNMM, respectivamente de 0,050 m e 0,074 m, apesar de possuírem peculiaridades importantes relacionadas à natureza de cada local. Como exemplos, a plataforma continental, o regime meteorológico, a temporalidade da série de NMM, entre outros aspectos. Na pesquisa de [28] é apontada essa similaridade de valores. Vale assinalar que na citada pesquisa foi utilizada uma metodologia diferente da tratada nesse artigo: baseada em modelos oceânicos de TNMM e referenciada ao elipsóide.

O valor de TNMM obtido para o sítio de Fortaleza foi de -0,242 m (utilizando o GRS80). A mesma estação apresentou o valor de -0,260 m na investigação realizada por [29] quando este autor utilizou o WGS84. A discrepância observada traduz, dentre outros possíveis fatores, a diferença de elipsóide, a época e a metodologia do levantamento GNSS. Em contrapartida, utilizando o mesmo elipsóide (GRS80), a diferença passa a ser de 0,916 m, dado que em [29] o valor da TNMM estimada é de 0,674 m. É fundamental salientar que a metodologia empregada por [29], apesar de ter considerado o mesmo elipsóide e o mesmo MGG aqui utilizados, têm diferenças significativas deste trabalho.

Por outro lado, a adoção do mesmo MGG possibilita fazer comparações mais adequadas, principalmente por que a altura geoidal é um dos fatores principais no cálculo da estimativa da TNMM (ver Eq. (2)). A adoção do tipo de MGG para a solução

é deveras importante, pois tal modelo pode ou não ser adequado à região de estudo. Uma comparação sobre essa questão aplicada ao Brasil pode ser vista em [23], no qual são analisados cinco diferentes MGGs, incluindo o XGM2019e, e apresentadas suas melhorias em termos de desvio padrão.

Outro aspecto fundamental tratado nessa pesquisa foi a análise da estimativa do potencial do modelo geoidal (ou quase geoidal). Ferreira *et al* [30] sustentam que é possível realizar tal análise por meio da comparação dos valores de altura geoidal/anomalia de altura provenientes de observação GNSS/Nivelamento com as derivadas do MGG. Os mesmos autores adicionam que o desvio padrão é o recurso estatístico mais indicado para a análise dos resultados. Ao aplicar a citada verificação aos sítios estudados obteve-se valores de desvios padrões variando entre 0,004 m a 0,007 m, o que indica que o modelo XGM2019e se adequa às regiões pesquisadas. Cabe pontuar que as menores discrepâncias foram apresentadas nos sítios de Niterói-RJ e Arraial do Cabo-RJ e as maiores em Salvador-BA e Fortaleza-CE, concordando com os resultados encontrados por [23].

As séries utilizadas no cálculo do NMM são fatores que implicam diretamente na determinação da TNMM. O recomendado é que sejam utilizadas séries de 18,6 anos (ciclo completo de nutação da Lua)<sup>[1]</sup>. No entanto, nos sítios adotados nesta pesquisa não se dispõe dessa quantidade de observações.

A decisão de utilizar os períodos em sua totalidade, ao invés de um período comum de observações, reside no fato de que quanto menor o período observado mais propício é o risco de variações pontuais afetarem os valores da série, ocasionando, conseqüentemente, tendências fictícias. Nesse sentido foram realizadas simulações, as quais mostraram que as estimativas do NMM resultaram em valores menos homogêneos à medida que o tempo de observações ia sendo diminuído; em alguns casos ocorria um aumento significativo desses valores. Essa questão aponta para a ocorrência de fatores sazonais em determinados períodos que podem apresentar tendências negativas ou positivas das séries maregráficas.

Outro aspecto relevante, como mencionado na seção 2.3, é que o cálculo do NMM não levou em consideração a correção de efeitos geodinâmicos, uma vez que as estações maregráficas de Niterói-RJ, Arraial do Cabo-RJ e Macaé-RJ não possuem uma estação GNSS contínua que possibilita o acompanhamento do fenômeno de movimentação crustal local. Já para o caso de Imbituba-SC, Salvador-BA e Fortaleza-CE, que possuem estações de monitoramento contínuo, existem questões relacionadas à alteração de referência do *International GNSS Service* [31] que necessitam de correções mais rigorosas, mas que fogem ao escopo desta pesquisa.

A detecção e quantificação dos movimentos verticais de origem não oceânicas são fundamentais para o refinamento dos valores dos NMM. Também o são para realizar uma comparação de fato compatível dos valores de TNMM provenientes dos modelos globais de TNMM, uma vez que esses modelos não sofrem com os possíveis desvios provocados pela movimentação vertical crustal, ao contrário dos sensores instalados na superfície terrestre.

## 4. Conclusões

O ensaio para determinação da estimativa da TNMM apresentada por este trabalho traz contribuições para a discussão sobre os preceitos atuais da determinação de referenciais verticais modernos.

O cálculo do NMM local mostrou-se consistente com o realizado em 2016 pelo IBGE [16]. Os aprimoramentos na análise e a inserção de dados do período de 2016 a 2019 permitiram representar e entender melhor o comportamento das tendências de elevação do nível do mar, além de proporcionar séries mais refinadas para estudos geodésicos, sobretudo nas séries com períodos de aproximadamente 15 anos, como as de Macaé-RJ, Imbituba-SC e Salvador-BA.

O MGG utilizado para determinação da TNMM, o XGM2019e, resultou adequado à região de estudo no grau e ordem utilizados, isto é, 2.190. Espera-se que quando esse MGG atinja seu desenvolvimento máximo de 5.540, possa contribuir com soluções ainda mais precisas.

A estratégia empregada neste trabalho apontou que os valores de TNMM para parte da costa brasileira estão coerentes com as abordagens que vêm sendo desenvolvidas em outras pesquisas. Esses resultados podem ser utilizados como subsídios para pesquisas que discutem acerca da utilização e aprimoramento de referenciais verticais.

Apesar dos resultados permitirem apontar o comportamento da relação entre o geóide e o NMM ao longo da costa brasileira, ainda é necessário estender esse estudo a outros locais com o objetivo de conhecer melhor o panorama da TNMM para o Brasil. Existem outros locais que possuem infraestrutura maregráfica

e geodésica que permitem aprimorar essa pesquisa, como exemplo, o marégrafo de Cananéia-SP.

É preciso considerar também a necessidade de mais aprimoramentos a fim de se ter o melhor refinamento possível para a determinação da estimativa da TNMM. Nesse sentido, é fundamental analisar os impactos da aplicação das taxas de movimentação crustal aos valores de NMM nos marégrafos que dispõem dessa informação, sobretudo, nos que possuem série temporal próxima de 18 anos. Outro fator relevante consiste em verificar a utilização de modelos globais oceânicos para o cálculo da TNMM, com o propósito de avaliar a influência da movimentação crustal na determinação da variação do NMM.

## Referências

- [1] W. TORGE, W.; J. MÜLLER, GEODESY. 4th. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2012. 433 p.
- [2] J. IHDE; L. SÁNCHEZ; R. BARZAGHI; H. DREWES; C. FOERSTE; T. GRUBER; G. LIEBSCH, U. MARTÍ; R. PAIL; M. SIDERIS, Definition and proposed realization of the International Height Reference System (IHR). *Surveys in Geophysics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 38, n. 3, p. 549–570, Mar. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10712-017-9409-3>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [3] L. SÁNCHEZ; M. G. SIDERIS, Vertical datum unification for the International Height Reference System (IHR). *Geophysical Journal International*, London: Royal Astronomical Society - RAS; Oxford: Oxford University Press, v. 209, n. 2, p. 570-586, May 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/gji/ggx025>>. Acesso em: 08 dez. 2021
- [4] L. M. DA SILVA, Análise da evolução temporal do datum vertical brasileiro de Imbituba. 270 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/47347>>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- [5] L. E. SJÖBERG; M. BAGHERBANDI, Gravity Inversion and Integration. 1. ed. Stockholm: Springer International Publishing, 2017. 283 p. ISBN 978-3-319-50297-7. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/978-3-319-50298-4>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [6] R. T. LUZ, Cálculo de altitudes científicas e sua aplicação no reajustamento da rede altimétrica de alta precisão do sistema geodésico brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 61, n. 1, p. 79–97, 2016. Disponível em: <<https://rbg.ibge.gov.br/index.php/rbg/article/view/43>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [7] M. S. FILMER; C. W. HUGHES; P. L. WOODWORTH; W. E. FEATHERSTONE; R. J. BINGHAM, Comparison between geodetic and oceanographic approaches to estimate mean dynamic topography for vertical datum unification: evaluation at Australian tide gauges. *Journal of Geodesy*, Springer Science and Business Media LLC, v. 92, n. 12, p. 1413–1437, Apr. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-018-1131-5>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [8] SIRGAS. Sistema de Referência Geodésico para as Américas. Grupo de Trabalho III. Disponível em: <<https://sirgas.ipgh.org/pt/organizacao/grupos-de-trabalho/grupo-de-trabalho-iii/>>. Acesso em: 19 mar. 2022.
- [9] H. DREWES, F. G.; KUGLITSCH; J. ADÁM; S. RÓZSA. The Geodesist 's Handbook 2016. *Journal of Geodesy*, v. 90, n. 10, p. 907-1205, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>>. Acesso em: 18 mar. 2022
- [10] T. HAYDEN; E. RANGELOVA; M. G. SIDERIS; M. VÉRONNEAU; Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE gravity field models. *Journal of Geodetic Science*, Walter de Gruyter GmbH, v. 2, n. 4, p. 290–301, Dec. 2012a. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/v10156-012-0003-9/html>>. Acesso em: 17 jan. 2021.



- [11] V. C. SILVA; G. N. GUIMARÃES, Analysis of the gravity potential in the stations of the permanent tide gauge network for geodesy obtained with different geoid models. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, Instituto de Geociências - UFRJ, v. 41, n. 3, p. 605–613, Dec. 2018. Disponível em: <[https://doi.org/10.11137/2018\\_3\\_605\\_613](https://doi.org/10.11137/2018_3_605_613)>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [12] DHN. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos. 2017. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2021.
- [13] O. B. ANDERSEN; K. NIELSEN; P. KNUDSEN; C. W. HUGHES; R. BINGHAM; L. FENOGLIO-MARC; M. GRAVELLE; M. KERN, S. P. POLO, Improving the coastal mean dynamic topography by geodetic combination of tide gauge and satellite altimetry. *Marine Geodesy*, Informa UK Limited, v. 41, n. 6, p. 517–545, Nov. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/01490419.2018.1530320>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [14] DHN. Normas da autoridade marítima para levantamentos hidrográficos. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>>. Acesso em: 08 dez. 2021.
- [15] R. DALAZOANA. Estudos dirigidos à análise temporal do Datum Vertical Brasileiro. 188 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- [16] IBGE. Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG - 2001 a 2015. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Relatório Técnico, 2016. 61 p.
- [17] S. SOARES; E. G. SANTOS; R. T. LUZ, Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como insumo para integração de altitudes e profundidades: resultados preliminares. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: UFPE, 2018. p. 742–751. Disponível em: <<https://www.ufpe.br/documents/39451/1384233/Anais+do+VII+SIMGEO/2ff23c73-935d-4418-8728-fefb24630f34>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [18] S. SOARES; E. G. SANTOS; A. L. DA SILVA; M. K. LIMA; J. C. S. SIQUEIRA; R. T. LUZ, Avaliação metodológica para conexão da estação GNSS (Global Navigation Satellite System) permanente de Imbituba a Rede Altimétrica Brasileira. In: Simpósio SIRGAS. Rio de Janeiro - RJ: Boletim No. 24, 2019. Disponível em: <[https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71\\_Soares\\_et\\_al\\_2019\\_Conexiao\\_Imbituba\\_GNSS.pdf](https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71_Soares_et_al_2019_Conexiao_Imbituba_GNSS.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- [19] IBGE. Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Manual Técnico, 2017. 56 p.
- [20] R. TENZER; V. VATRT; A. ABDALLA; N. DAYOUB, Assessment of the LVD offsets for the normal-orthometric heights and different permanent tide systems - a case study of New Zealand. *Applied Geomatics*, Springer Science and Business Media LLC, v. 3, n. 1, p. 1–8, Dec. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12518-010-0038-5>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.
- [21] J. HUANG, Determining coastal mean dynamic topography by geodetic methods. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union (AGU), v. 44, n. 21, Nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/2017gl076020>>. Acesso em: 17 jan. 2021.
- [22] P. ZINGERLE.; R. PAIL.; T. GRUBER; X. Oikonomidou, The experimental gravity field model XGM2019e. GFZ Data Services, 2019. Disponível em: <<https://dataservices.gfz Potsdam.de/icgem/showshort.php?id=escidoc:4529896>>. Acesso em: 20 jan. 2021
- [23] P. ZINGERLE.; R. PAIL.; T. GRUBER; X. Oikonomidou, The combined global gravity field model XGM2019e. *Journal of Geodesy*, Springer Science and Business Media LLC, v. 94, n. 7, Jul. 2020. Disponív-

el em: <<https://doi.org/10.1007/s00190-020-01398-0>>. Acesso em: 16 jan. de 2021.

[24] T. GRUBER; P. ZINGERLE; R. PAIL; X. Oikonomidou, High resolution gravity field models as global reference surface for heights. In: SIRGAS 2019. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019. Disponível em: <[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/44\\_Gruber\\_et\\_al\\_2019\\_HR\\_Models.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/44_Gruber_et_al_2019_HR_Models.pdf)>. Acesso em: 19 jan. 2021.

[25] D. BLITZKOW, A. C.; MATOS; J. ADÁM; V. C. MACHADO.; M. A. NUNES; N. V. LENGGRUBER; E. L. X. XAVIER; L. P. S. Fortes. MAPGEO2015: o novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, n. 10, p. 1873-1884, 2016. Disponível em: <<https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44289>>. Acesso em: 18 mar. 2022.

[26] P. CALDWELL, HOURLY SEA Level Data Processing and Quality Control Software: SLP64 User Manual. Honolulu: University of Hawaii Sea Level Center, 2014. v. 4. 67 p.

[27] E. G. SANTOS, Integração entre a Rede Altimétrica de Alta Precisão, a Rede Geodésica de Referência Costeira e os Níveis de Referência Maregráficos. 132 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Cartográfica). Instituto Militar de Engenharia.

[28] V. P. REIS; L. G. BARBOSA; A. S. Palmeiro. Determinação da topografia do nível médio do mar com altimetria por satélites. R. bras. Geom., Curitiba, v. 6, n. 2, p. 77-98, abr/jun. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5517>>. Acesso em: 08 dez. 2021.

[29] T. A. SANTANA, Contribuições para os estudos de integração das componentes verticais terrestre e marinha ao longo da costa brasileira. 141 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

[30] V. G. FERREIRA; S. R. C. DE FREITAS; B. A. HECK, Separação entre o geoide e o quase geoide: uma análise no contexto brasileiro. Revista Brasileira de Cartografia, v. 63, n. Edição especial, 2011. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/43766>>. Acesso em: 19 jan. 2021.

[31] IBGE. Solução multianual das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS no período de 2000 a 2019. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, relatório metodológico, 2021. 117 p. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101895.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2021.