

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – CAMPUS MONTE CARMELO
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA**

VALÉRIA CRISTINA SILVA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE GRAVIDADE NAS ESTAÇÕES DA REDE
MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA OBTIDO COM DIFERENTES
MODELOS GEOIDAIS**

MONTE CARMELO

2017-2

VALÉRIA CRISTINA SILVA

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE GRAVIDADE NAS ESTAÇÕES DA REDE
MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA OBTIDO COM DIFERENTES
MODELOS GEOIDAIIS**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães

MONTE CARMELO

2017-2

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE GRAVIDADE NAS ESTAÇÕES DA REDE
MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA OBTIDO COM DIFERENTES
MODELOS GEOIDAIIS**

Projeto aprovado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia avaliado pela banca examinadora formada por:

Monte Carmelo, 01 de dezembro de 2017.

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães, IG/UFU

Prof. Me. Vinícius Francisco Roffato, IG/UFU

Prof. Dr. Wagner Carrupt Machado, FECIV/UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por iluminar e abençoar os meus passos, por ter me concedido saúde e ter me fortalecido nos momentos difíceis.

Agradeço aos meus pais, José e Dagmar, por ter me fornecido todo o suporte possível para que eu chegasse até aqui, pelos conselhos valiosos e apoio às minhas decisões.

Às minhas irmãs Amanda e Vanessa, pelo companheirismo e ajuda nos momentos em que necessitei.

Ao meu namorado, Geovane, pela amizade e o apoio emocional.

Aos meus amigos, em especial, Andréia, Willian, Ana Carolina, Jéssica e Jovana por sempre estarem presentes e por terem me proporcionado momentos de descontração que me ajudaram nesta trajetória.

Ao professor Gabriel pela orientação, ensinamentos e sugestões durante as aulas e na execução deste trabalho.

A todos os docentes, pela dedicação, as dicas importantes e todo o conhecimento transmitido.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma no meu caminhar, possibilitando a conclusão desta etapa importante de minha vida

“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.”

Charles Chaplin

RESUMO

A fim de unificar o sistema de altitudes no país e possivelmente no mundo, e atender as exigências em termos de acurácia da Geodésia moderna, a Associação Internacional de Geodésia impôs que as altitudes devem ser baseadas em uma superfície equipotencial definida como potencial W_0 . Os existentes *data* altimétricos do Brasil, Imbituba e Santana, são baseados em medições do nível médio do mar e não possuem conexão devido a impossibilidade de conectar toda a rede altimétrica via nivelamento geométrico. Este trabalho objetiva calcular o potencial nas estações maregráficas pertencentes a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia, utilizando elementos de referência das estações maregráficas, modelos globais do geopotencial como os modelos GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 e o modelo brasileiro oficial do geoide, 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 -0,5 a 0,4 metros para a TNMM e valores de potencial para as estações em torno do valor de W_0 computado globalmente de $62636853,4 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

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

ABSTRACT

In order to unify the height system in the country and possibly in the world, 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 defined as potential W_0 . The existing *data* of Brazil, Imbituba and Santana, are based on measurements of the mean sea level and do not have connection due to the impossibility to connect the entire altimetric network by geometric leveling. This paper aims to calculate the potential of the tide gauge from the Permanent Tide Gauge Network for Geodesy (RPMG), using reference elements of the tide gauge, 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 -0.5 and 0.4 meters for the SST and the potential values for the tide gauges around of the W_0 value computed globally of $62636853.4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$.

Key words: W_0 . Geodesy. Sea Surface Topography. Vertical *Datum*.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Rede Maregráfica Permanente para Geodésia e Rede Altimétrica de Alta Precisão	12
Figura 2	Estimação Geométrica da TNMM	16
Figura 3	Grandezas envolvidas no sistema de altitude	18
Figura 4	Superfícies e variáveis envolvidas na altitude ortométrica	20
Figura 5	Nivelamento visadas iguais	23
Figura 6	Satélite GOCE	25
Figura 7	Área de estudo	29
Figura 8	Elementos de Referência das EMs	30
Figura 9	Processos realizados para o cálculo do potencial e altitudes normais.	34
Figura 10	Gráfico de dispersão das alturas geoidais e TNMM	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Código e altitude elipsoidal das RNs primárias das EM.	31
Tabela 2	Altura da RN primária acima do nível de redução	31
Tabela 3	Altura entre o NR e o NMM local.	32
Tabela 4	Valor de N de modelos globais do geopotencial para as EMs	33
Tabela 5	Valor de N do modelo oficial do geoide para as EMs	33
Tabela 6	Valores obtidos de gravidade normal nas EM.	34
Tabela 7	TNMM das EMs calculada por diferentes modelos.	35
Tabela 8	Comparação dos valores de N e TNMM nas EMs de estudo	37
Tabela 9	W_p nas EMs	38
Tabela 10	Números Geopotenciais das EMs de acordo com modelos do geoide	39
Tabela 11	H normal para o modelo MAPGEO2015	39
Tabela 12	Altitudes ortométricas das RRNN primárias	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	10
3 JUSTIFICATIVA	10
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
4.1 A Evolução da Rede Maregráfica	11
4.2 <i>Datum</i> Vertical Brasileiro	14
4.3 Topografia do Nível Médio do Mar	15
4.4 Altitudes.....	18
4.4.1 Número Geopotencial	19
4.4.2 Altitudes Físicas	20
4.4.3 Altitudes Geométricas	22
4.5 Modelos Globais do Geopotencial e Modelo Oficial Brasileiro do Geoide	24
4.5.1 Missão GOCE	25
4.5.2 EIGEN-6C4.....	26
4.5.3 GECO.....	26
4.5.4 XGM2016.....	27
4.5.5 MAPGEO2015	27
5 MATERIAL E MÉTODOS	28
5.1 Área de Estudo.....	28
5.2 Níveis de Referência	29
5.3 Altura Geoidais	32
5.4 Método	33
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Por virtude dos avanços tecnológicos, as técnicas de posicionamento de satélites foram aperfeiçoadas dando origem a modelos do geopotencial capazes de determinar o campo de gravidade com alta precisão. Esse progresso tem contribuído para a solução de diversos problemas da Geodésia, dentre eles, a possibilidade de implantar um Sistema de Referência Internacional de Altitude (*International Height Reference System - IHRS*).

O sistema de altitude do Brasil é composto 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). Sendo essa, definida como a separação do nível médio do mar e o geoide (SANCHÉZ, 2009). A falta da informação da TNMM na determinação da altitude, juntamente com demais erros durante o ajustamento da rede altimétrica, propagam erros que ocasionam a não conexão entre os *data* verticais.

Atualmente, o Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) se encontra em fase de aprimoramento e busca integrar todas as soluções e métodos geodésicos para a definição de um sistema de altitude, conforme recomenda os pressupostos da IAG (*International Association of Geodesy*). Dentre as instituições que estão a cargo desse desenvolvimento, tem-se o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), responsável pela manutenção da Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia (RMPG), que por meio dos relatórios, publica os avanços e necessidades que a rede possui.

Em meio aos problemas, citados por IBGE (2013), que inviabilizam a definição de um *datum* altimétrico consistente, destaca-se a ausência de informações gravimétricas e a pequena quantidade de conexões determinadas com GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e nivelamento geométrico. Contudo, o IBGE, almeja em um futuro próximo, realizar um novo ajustamento dos desníveis da Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) com a integração da TNMM, dados de aceleração da gravidade e a melhoria do circuito de nivelamento, para assim atender ao IHRS (IBGE, 2016).

A IAG, responsável por pesquisas de Geodésia em âmbito global, determina que para definir e realizar o IHRS, 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 , o qual foi calculado globalmente baseado no modelo mais recente do campo de gravidade da Terra e de

modelos de superfície do mar.

No entanto, a fim de estabelecer a altitude em termos do W_0 , é necessário recorrer a técnicas que determinem a TNMM. As metodologias comumente empregadas são a altimetria por satélites e modelos oceânicos que demandam investimento financeiro e uma qualidade que ainda não foi alcançada. Em contrapartida, os recentes modelos globais do geopotencial tem apresentado alta resolução em suas soluções e tem permitido a determinação da ondulação geoidal de forma precisa, além de auxiliar na produção de modelos locais do geoide, como o modelo oficial brasileiro MAPGEO2015. 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 para posteriormente estabelecer altitudes físicas.

2 OBJETIVOS

A medida que as instituições brasileiras se esforçam para satisfazer os novos padrões da Geodésia moderna a fim de viabilizar o cálculo do potencial em todo território, o presente trabalho vislumbra calcular a TNMM e estabelecer o valor do W_0 para cada estação maregráfica por meio dos seus respectivos níveis de referências e os modelos do geopotencial mais recentes. Em decorrência dos resultados, os modelos do geopotencial serão comparados e discutidos, assim como, os novos valores de altitude com a inserção da TNMM.

3 JUSTIFICATIVA

A utilização de um sistema de referência altimétrico tornou-se essencial ao passo que regiões litorâneas passaram a ser ocupadas pelo homem e que obras de engenharia foram se desenvolvendo. Logo, houve a necessidade de refinar o sistema de altitude para a aplicação em diferentes atividades como dimensionamento de redes de drenagem, estabelecimento de cotas de segurança, avaliação da vulnerabilidade costeira, riscos de inundação, planejamento urbano, dentre outros.

Não obstante aos demais países, o Brasil adotou um método tradicional de sistema de altitudes baseado em observações do nível médio do mar local, e desta forma, prolongou ao longo do território essas informações via nivelamento. Por ventura de obstáculos, a ligação de toda rede altimétrica é impraticável, havendo a necessidade da existência de dois *data* para atender a demanda de toda extensão do país.

Haja vista ao foco dado nas recentes resoluções publicadas pela IAG, os existentes referenciais verticais não satisfazem as exigências em precisão para determinar e investigar as mudanças globais da Terra e monitorar o nível do mar (SANCHÉZ, 2009). Neste âmbito, é primordial adotar um *datum* moderno que atenda os interesses primeiramente nacionais e posteriormente globais, eliminando as distorções existentes causadas pela carência de informações e erros sistemáticos e grosseiros.

A proposta do IHRS, inicialmente, consiste em estabelecer diretrizes para que cada *datum* atribua o nível de referência físico W_0 no sistema de altitudes. Todavia, esse valor somente poderá ser obtido a partir da TNMM, à qual é referenciada a uma superfície com um potencial conhecido. Para determinar a TNMM pode-se recorrer a três métodos distintos: 1) combinando registro das médias do nível do mar com modelos geopotenciais, 2) altimetria por satélites e modelos geopotenciais, 3) modelos oceânicos (HAYDEN et al., 2012).

Na mesma perspectiva, um dos esforços citados pelo IBGE é 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). Uma vez que até o momento não foi calculado a TNMM conforme o desejado, torna-se indispensável calcular a TNMM via outros métodos.

A vista disto, a proposta deste trabalho tem fundamental importância posto que o valor a ser obtido poderá contribuir para futuros estudos e comparações, as quais acarretarão na propagação das altitudes relacionadas ao W_0 para todo território nacional e possivelmente na realização do IHRS.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A Evolução da Rede Maregráfica

A integração do nível médio dos mares como referencial altimétrico, intensificou a utilização de marégrafos para monitorar o nível do mar de forma sistemática e desencadeou a instalação de inúmeras estações ao longo do litoral brasileiro que foram operadas por diversas instituições. A criação do *datum* vertical aconteceu entre os anos de 1949 a 1957 pelo Conselho Nacional de Geografia (CNG), época a qual foi estabelecida uma parceria do governo brasileiro com entidades americanas. Na ocasião, a empresa *Inter-American Geodetic Survey* (IAGS) ficou a cargo de atividades geodésicas no Brasil e monitorou os marégrafos (LUZ; GUIMARÃES, 2003). Posteriormente, no ano de 1971, a IAGS encerrou os serviços no Brasil deixando-os a cargo da empresa Portobrás, a qual permaneceu até o

ano de 1990. Logo depois, a Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), pertencente a Marinha do Brasil, o Instituto Oceanográfico (IO) da Universidade de São Paulo (USP) e o Instituto de Pesquisas Hidroviárias (InPH), operaram as estações restantes até o ano de 1993, quando a Sociedade Brasileira de Cartografia (SBC), juntamente com a Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), levaram adiante e amadureceram a ideia de estabelecer uma rede maregráfica de forma permanente (IBGE, 2016).

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 a necessidade de estabelecer um referencial altimétrico permanente que atendesse todo território nacional e que acompanhasse os requisitos estabelecidos pela Geodesia atual (LUZ; NEVES; FREITAS, 1996 apud IBGE, 2016). No ano de 2001 a RPMG começou a ser materializada e possuiu cinco estações até o ano de 2015. Porém, devido a não possibilidade de renovação do acordo entre a empresa Portobrás e o IBGE, a estação de Macaé foi desativada. No entanto, as observações até então coletadas são de grande valia para o posterior ajustamento da rede altimétrica. Em contrapartida, a estação de Santana possui vários anos de observações, contudo, os recentes arquivos do IBGE não possuem o processamento e ajustamento da mesma em razão da inconsistência dos dados. A Figura 1 retrata as estações ativas e estações programadas (IBGE, 2016).

Figura 1- Rede Maregráfica Permanente para Geodésia e Rede Altimétrica de Alta Precisão



Fonte: IBGE (2017).

As estações maregráficas (EMs) que compõe a RMPG utilizam como parâmetro fundamental o Nível Médio dos Mares (NMM), o qual é determinado com base em medições que mensuram o nível do mar local por EMs. Visto que o litoral brasileiro é extenso e possui áreas de difícil acesso, existem EMs que não são correlacionadas e causam distorções na rede altimétrica, como é o caso do *datum* de Santana. Sabe-se que altitude do estado do Amapá, obtido pelo nível médio do mar no Porto de Santana, não corresponde ao *datum* de Imbituba devido à dificuldade de cruzar a região do Estuário do Rio Amazonas e a Ilha de Marajó utilizando o nivelamento geométrico de alta precisão (IBGE, 2016). Consoante a esta problemática, a RMPG almeja a vinculação temporal e espacial dos *data* verticais brasileiros em Imbituba e Santana aos referenciais maregráficos utilizados pela engenharia costeira e na cartografia náutica (IBGE,2013).

É notório que o comportamento do mar não é similar em regiões distintas, caracterizando-o como uma superfície não estática. Logo, a implantação de EMs em diferentes pontos da costa possui o propósito de identificar possíveis perturbações que possam ocorrer a uma estação. Luz, Neves e Freitas (1996) apud IBGE (2016), afirmam que é necessário homogeneizar espacialmente as observações de nível do mar uma vez que cada estação está sujeita a impactos geofísicos e ambientais diferenciados. Assim, é imprescindível que haja a simultaneidade na coleta de informações de cada marégrafo que compõe a rede a fim de definir o *datum* vertical.

Tendo em vista que as estações que são responsáveis por estabelecer *data* verticais estão suscetíveis a movimentações da crosta, não é apropriado que o sistema seja definido somente por observações de redes maregráficas, tornando indispensável o monitoramento contínuo por equipamentos que forneçam informações para futuras correções. Segundo Dalazoana et al. (2005), o monitoramento contínuo da posição geocêntrica do marégrafo, assim como, a realização de campanhas de rastreamento propicia a detecção de possíveis soerguimentos ou subsidências crustais. Desta maneira, visando posicionar a rede maregráfica geocentricamente, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), deve atuar junto os sensores, proporcionando a realização de medições do nível do mar correspondentes ao sistema das informações obtidas pela Altimetria por Satélites (ALTSAT) (IBGE, 2013).

4.2 Datum Vertical Brasileiro

O *datum* vertical brasileiro, referência que é utilizada para a determinação de altitudes, foi estabelecido no ano de 1946 quando o IBGE iniciou a implantação das Referências de Nível (RRNN) da RAAP. A estação maregráfica de Torres no estado do Rio Grande do Sul foi adotada como *datum* temporário fundamentado em observações feitas entre os anos de 1919 e 1920. A escolha deste referencial de nível viabilizou que grandes obras de engenharia, obras de saneamento básico, irrigação, estradas e telecomunicações tivessem um parâmetro para adotar enquanto o sistema não fosse adequadamente definido (IBGE, 2010).

Posto que em 1958 a rede altimétrica já possuía mais de 30 000 quilômetros de linhas de nivelamento, a estação de Torres contava com poucos anos de observações enquanto que a estação de Imbituba possuía nove anos. Em decorrência desta diferença, o *datum* vertical de Torres foi substituído pelo *datum* de Imbituba localizado em Santa Catarina e definido por meio dos níveis médios do mar anuais entre os anos de 1949 a 1957 (LUZ; FREITAS; DALAZOANA, 2002). À proporção que a RAAP foi se estendendo, percebeu-se a impossibilidade de cruzar a região do Amapá por completo. Em razão deste fato, houve a necessidade de criar um referencial vertical para esta localidade utilizando as observações do porto de Santana entre os anos de 1957 a 1958.

Após a definição dos *data*, a agência de mapeamento americana IAG responsável pela operação dos marégrafos, não utilizou as observações para refinar o *datum* de Imbituba. Segundo Silva, Freitas e Dalazoana (2016), o órgão que possui o banco de dados das médias mensais, o *Permanent Service for Mean Sea Level* (PSMSL), também não possui as informações dos anos de 1949 a 1969 e depois da transição das estações para companhias brasileiras. Luz, Freitas e Dalazoana (2002), pautam que, “no entanto, as observações existem, sendo necessário iniciar-se um processo de recuperação e conversão dos registros gráficos”.

Conforme as referências de nível foram implantadas e foram definidos os *data* verticais oficiais, a RAAP (Figura 1) expandiu no país compondo a referência altimétrica do SGB. A partir de 1945 as RRNN foram estabelecidas em torno de ferrovias e rodovias brasileiras, totalizando 70 mil RRNN e 180 quilômetros de duplo caminhamento de nivelamento geométrico. Tal desenvolvimento aconteceu em três fases, sendo que a primeira se conteve nas áreas de maior densidade populacional e desenvolvidas economicamente, a segunda estendeu-se para o interior do país estruturando os estados do Acre e Roraima ao longo das rodovias ali presente, e a terceira fase consistiu na reconstituição de redes de alta

precisão que se encontravam destruídas e de redes que no passado pertenciam a outras instituições (LUZ; GUIMARÃES, 2001).

4.3 Topografia do Nível Médio do Mar

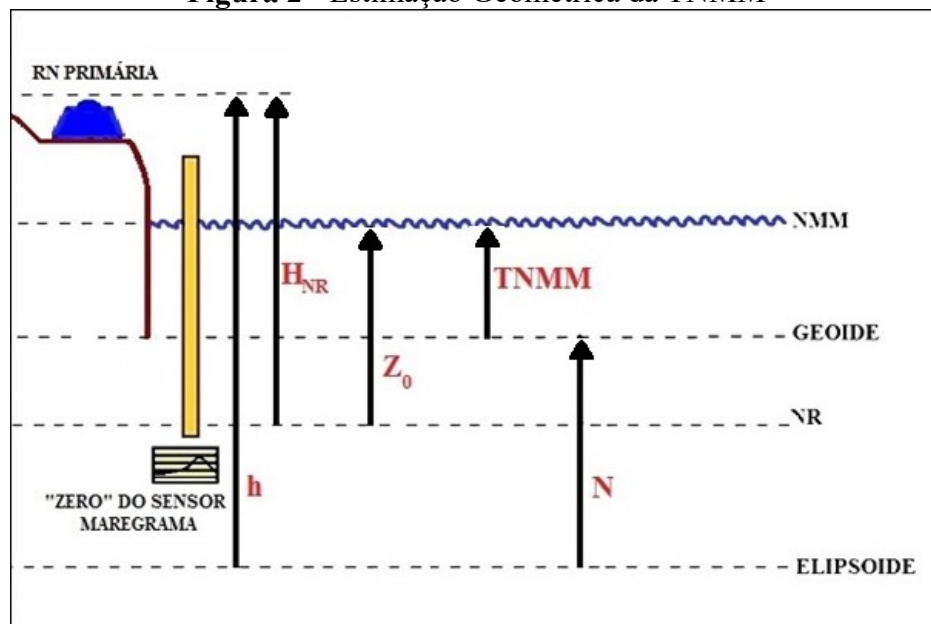
Ao passo que estudos sobre o comportamento dos oceanos foram desenvolvidos, notou-se que, mesmo considerando longas séries de observações de EMs, o nível médio do mar ainda não correspondia ao geóide (LUZ et al., 2008), e tais desvios poderiam ter como causa movimentos das correntes oceânicas e a diferença de expansão volumétrica em meio às águas tropicais e polares (VANÍCEK, KRAKIWSKY, 1986). Em decorrência a esses fenômenos, as regiões de costa também estão sujeitas a sofrer movimentações a longo prazo causada pelos mesmos fatores. Tal fato torna necessária a determinação da topografia do mar para cada estação maregráfica a fim de correlacionar as observações à superfície geopotencial.

A definição da topografia é uma outra objeção que vem sendo discutida recentemente e é referida na literatura 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). A delimitação da TNMM ao longo da costa brasileira, permitiria a resolução do problema de valor de contorno da Geodésia e alcançaria a meta do IBGE de refinar o sistema de altitudes (IBGE, 2013), monitoraria as mudanças do nível médio do mar, e a posteriori poderia corroborar com a execução do IHRS.

Há de se considerar que o cálculo TNMM pelos três diferentes métodos citados por Hayden et al. (2012): 1- combinando registro das médias do nível do mar com modelos geopotenciais; 2- altimetria por satélites e modelos geopotenciais; 3- modelos oceânicos; envolvem uma série de fatores, os quais resultam em somente uma estimativa devido às possíveis inexatidões em determinar cada elemento que a influencia. Comumente, a sua aproximação é realizada recorrendo a altimetria por satélites, acompanhado da mensuração de fenômenos como a temperatura, salinidade, observações de registros maregráficos, velocidade das correntezas dentre outros (LOPES, 2010). Embora a utilização das missões espaciais de altimetria por satélite, as quais estimam a TNMM determinando o nível médio do mar baseado em um elipsoide de referência seja o método mais utilizado, a TNMM em regiões costeiras não é modelada em grande resolução (SILVA, 2017).

O método utilizado por este trabalho recorre ao primeiro método colocado 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 divulgados pelo IBGE e pela DHM. 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 será calculado a TNMM.

Figura 2 - Estimação Geométrica da TNMM



Fonte: Adaptado de IBGE (2016) e Hayden, et al. (2012).

Onde, as referências representadas são:

- Elipsoide;
- Zero do sensor maregrama retrata o local de onde o sensor está disposto para determinar o nível médio do mar (IBGE, 2013);
- Nível de Redução (NR) é a referência de onde teve a menor maré registrada (DHN, 2017);
- Geoide;
- NMM local, fornecido pelo IBGE (2015), e calculado acima do “zero” do sensor maregrama;
- Referência de Nível 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 : é a altura geoidal fornecida pelos modelos de geopotencial.

Desta forma, embasado nas variáveis representadas tem-se o cálculo da topografia do nível médio do mar equação (1) (HAYDEN et al., 2012).

$$TNMM = \vec{h} - \vec{N} - \vec{H}_{NR} + \vec{Z}_0 \quad (1)$$

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 2 a seguir (HAYDEN et al., 2012).

$$W_P = W_0 - [(\vec{h} - \vec{N} - \vec{H}_{NR} + \vec{Z}_0) \gamma_P] \quad (2)$$

Onde, γ_P refere-se à gravidade normal, calculada aproximadamente pela equação da Somigliana (MORITZ, 1980).

$$\gamma = \frac{a \gamma_e \cos^2 \Phi + b \gamma_p \sin^2 \Phi}{\sqrt{a \gamma_e \cos^2 \Phi + b \gamma_p \sin^2 \Phi}} \quad (3)$$

Tem-se na equação, a gravidade normal no equador (γ_e) e nos polos (γ_p), a latitude geodésica do ponto de interesse (Φ), e o valor do semieixo maior (a) e o semieixo menor (b) do elipsoide de referência.

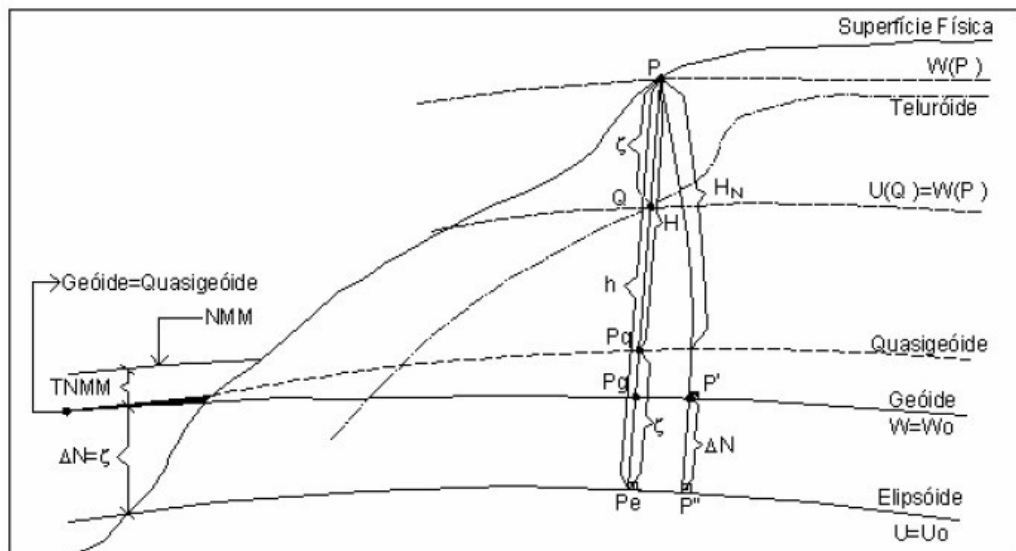
A partir das equações expostas, é possível calcular a separação entre o nível médio do mar e o geóide a partir do W_0 e W_P conforme a equação (4) (HAYDEN et al., 2012).

$$TNMM_P = \frac{W_0 - W_P}{\gamma_P} \quad (4)$$

4.4 Altitudes

Antes de realizar qualquer atividade prática que envolva a aplicação da altimetria, é necessário tomar conhecimento do tipo de altitude que deverá ser usada, uma vez que a superfície de referência da mesma pode se diferir possuindo conceito geométrico ou físico. A diferença entre duas superfícies, sendo de nível ou não, em uma determinada direção define a altitude (FREITAS; BLITZKOW, 1999). Com intuito de definir a altitude em superfícies distintas, houve a necessidade de se criar algumas referências para facilitar os cálculos e transferi-las para as demais. A Figura 3 ilustra os diferentes tipos de superfícies de referência e o sistema de altitudes.

Figura 3 - Grandezas envolvidas no sistema de altitude



Fonte: Freitas e Blitzkow, (1999).

Tem-se como parâmetro para altitude, as superfícies físicas, elipsoidal, geoidal, teluroide e quasi-geoide. Blitzkow e Freitas, (1999) explicam que o geoide, forma da superfície da Terra, é definida como uma superfície equipotencial que melhor ajusta no sentido do método dos mínimos quadrados ao nível médio mares. Desta forma, a determinação do geoide requer também a definição de um modelo do geopotencial, denominada como Problema de Valor de Contorno para a Geodésia (PVCG). A solução desta problemática é a obtenção da altura geoidal que é resolvida pela integral modificada de Stokes. Contudo, devido à dificuldade em se conhecer a distribuição de densidades no interior da crosta delimitado pela superfície geoidal e física, a solução do PVCG é complexa de ser realizada. Por fim, Molodenskii estabeleceu como alternativa utilizar a superfície física como

superfície de contorno, assim obtém-se a anomalia de altura, que é estabelecida entre o elipsoide e o quase-geoide, sendo essa uma superfície não equipotencial.

Considerando as superfícies tomadas como parâmetro para determinar altitudes, tem-se dois tipos de altitudes. A altitude de sentido geométrico é determinada com base matemática, não possui significado físico uma vez que se desconsidera o campo de gravidade. Enquanto que a altitude com sentido físico, é determinada com base na superfície equipotencial do campo de gravidade, normalmente materializada por marégrafos (SOUZA, 2006).

4.4.1 Número Geopotencial

Usualmente, escolhe-se o geoide como superfície equipotencial de referência e expressa-se o número geopotencial, definido pela diferença de potencial entre um determinado ponto na superfície e o potencial de gravidade na superfície do geoide (JEKELI, 2000). Sendo esse, a base para determinar a componente vertical com sentido físico, a qual é o objetivo do presente trabalho. A equação (5) mostra como pode obtê-lo (YILMAZ, 2008).

$$C_P = W_O - W_P = \int_0^P g \cdot dh = \sum_{i=0}^P g_i \cdot dh_i \quad (5)$$

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 referência W_O . Pela equação diferencial, dh é a diferença de altitude multiplicado pela gravidade g , ou pelo somatório, o número geopotencial é a soma de todas diferenças de altitudes dh_i multiplicado pela gravidade g_i . A unidade de medida de C é unidades de geopotencial (GPU) ou $\text{kgal} \times \text{m}$. De acordo com Robson (1991), o número é igual na mesma superfície equipotencial, porém não tem dimensão de distância. Assim, para medir H em unidades de comprimento basta dividir o número geopotencial pela gravidade do ponto a determinar, conforme a equação (6).

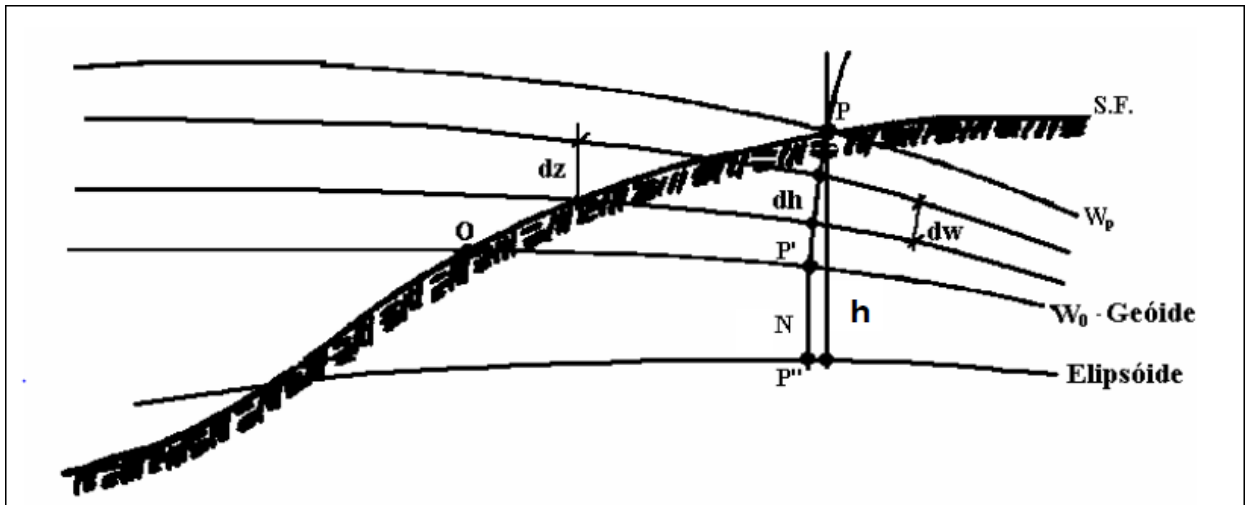
$$H = \frac{C}{g} \quad (6)$$

4.4.2 Altitudes Físicas

4.4.2.1 Altitude Ortométrica

A altitude ortométrica é definida como a distância do ponto de interesse na superfície física da Terra e o geóide, medida ao longo da vertical e perpendicular aos demais planos. A Figura 4 exemplifica as superfícies de referência.

Figura 4 – Superfícies e variáveis envolvidas na altitude ortométrica



Fonte: Blitzkow e Freitas (1999).

Por meio da Figura 4 e a equação (5) Blitzkow e Freitas, (1999) expõem a equação (7) a seguir:

$$\int_0^P g dz = \int_{P'}^P g' dh \quad (7)$$

Aplicando o teorema do valor médio tem-se:

$$\int_0^P g dz = g_m \int_{P'}^P g dh = g_m H_P \quad (8)$$

Onde a altitude ortométrica pode ser expressa da seguinte forma:

$$H_P = \frac{\int_0^P g dz}{g_m} \quad (9)$$

Utilizando a equação (5) referente ao número do geopotencial obtém-se:

$$H_{P(ort)} = \frac{C_P}{g_m} \quad (10)$$

O valor médio da gravidade g_m é referente aos pontos P na superfície física e P' na superfície do geoide, mostrados na Figura 3. Esse valor é árduo de se determinar pois o mesmo é dependente da estrutura da crosta entre P e P'. Assume-se assim, valores aproximados envolvendo dados de modelo crustal, modelo topográfico, densidade e outros (SOUZA, 2006). A equação (11) exibe uma aproximação.

$$g_m = \frac{1}{H_{ort}} \int_0^{H_{ort}} g dH \quad (11)$$

A altitude ortométrica também pode ser calculada aproximadamente a partir da altitude elipsoidal h_P que pode ser obtida realizando posicionamento com GNSS. Pode-se conhecer o valor da ondulação geoidal N a partir da equação (12).

$$N \cong h_P - H_{ort} \quad (12)$$

4.4.2.2 Altitude Normal

A altitude normal, equação (13), foi proposta por Molodenski como a solução para o problema do desconhecimento dos modelos de distribuição de densidades de massa no interior da crosta, de forma a facilitar o cálculo da altitude ortométrica substituindo a gravidade média g_m pela gravidade normal γ e o potencial da gravidade W por potencial gravitacional normal U (BLITZKOW;FREITAS, 1999).

$$H_{NP} = \frac{C_P}{\gamma} \quad (13)$$

A altitude normal será de grande valia na execução deste trabalho em decorrência da falta de informações de gravidade sobre todas as EMs. Logo, esta será utilizada para estimar os valores das componentes verticais corrigidas com a TNMM.

4.4.2.3 Altitude Normal-Ortométrica

A altitude normal-ortométrica H^{N-o} , surgiu com o intuito de solucionar a carência de dados gravimétricos em estações de nivelamento. No seu cálculo, substituiu-se o número geopotencial pelo número esferopotencial C' , o qual é derivado da gravidade normal. Desta forma, a equação é expressa por (14) (ODUMOSO et al, 2015).

$$H^{N-o} = \frac{C'}{\gamma} \quad (14)$$

Onde C' é a subtração do potencial normal na superfície topográfica pelo potencial normal na superfície de potencial normal zero. A altitude normal-ortométrica pode ser também obtida por meio de nivelamento aplicando-se correções (SNEEUW, 2013). Onde a Correção Normal-Ortométrica (CON) pode ser expressa de forma simplificada pela equação (15)

$$CON = -0,0053 \times H_{AB} \times \Delta\Phi_{AB} \times \text{sen}2\Phi_{AB} \quad (15)$$

Onde

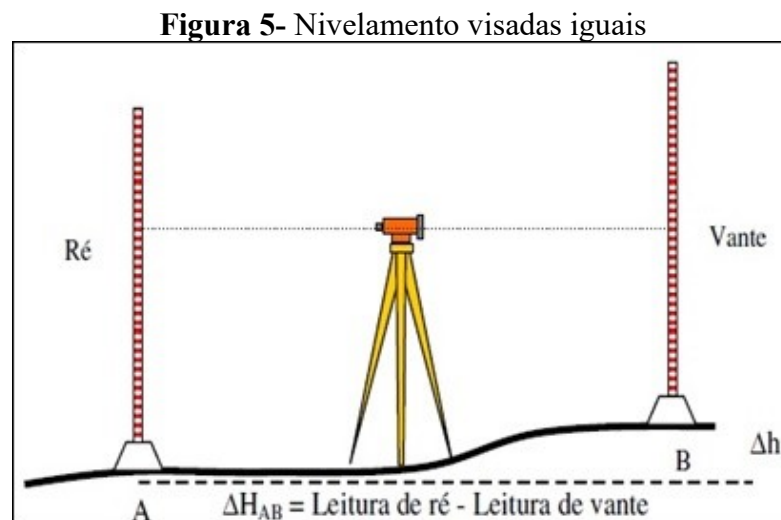
- Φ_A : latitude da estação de referência;
- Φ_B : latitude da estação a ser calculada;
- $H_{AB} = 0,5 (H_A + H_B)$, H_A e H_B são altitudes brutas;
- $\Delta\Phi_{AB} = (\Phi_B - \Phi_A)$;
- $\Phi_{AB} = 0,5(\Phi_B + \Phi_A)$

4.4.3 Altitudes Geométricas

A altitude do tipo geométrica pode ser dividida em altitudes niveladas, obtidas pelo processo de nivelamento geométrico, e a altitude geodésica obtida por receptores GNSS que determinam coordenadas cartesianas que são transformadas para latitude, longitude e altitude. Ambas independem do campo de gravidade da Terra, possuindo somente caráter matemático.

4.4.3.1 Altitude Nivelada

A altitude nivelada, a qual consiste na mensuração de desníveis entre diferentes pontos, tem grande valia na Geodésia pois é em decorrência da execução de linhas de nivelamento que a altitude é propagada para as demais localidades do país, formando a RAAP. O procedimento para a determinação da altitude nivelada, denominado nivelamento geométrico, é realizado por instrumentos ópticos ou ópticos/eletrônicos. Por meio de tais instrumentos é feita a leitura de duas miras graduadas, fixadas na posição ré e vante (Figura 5). Desta forma, os valores lidos são subtraídos e tem-se como resultado a diferença de nível entre os pontos.



Fonte: (VEIGA et al., 2012).

No entanto, por virtude de irregularidades da distribuição de massas e a superfície elipsoidal, o desnível obtido será diferente pois a superfície equipotencial geralmente não é paralela e as linhas de colimação dos níveis são tangentes a superfície equipotencial (BLITZKOW; FREITAS, 1999). Uma vez que altitude nivelada é dependente do campo de gravidade e das irregularidades topográficas, o desnível dependerá do percurso percorrido. Há de se considerar que devido ao achatamento, o nivelamento deve obedecer a distância máxima de dez quilômetros de extensão.

4.4.3.2 Altitude Geodésica

A altitude geodésica, também chamada de elipsoidal ou geométrica é a observação calculada por meio da distância entre superfície física e elipsoidal, por intermédio de coordenadas cartesianas referenciadas ao centro do elipsoide. Sua determinação é feita

utilizando a técnica de posicionamento de satélites e é transmitida para receptores GNSS, sendo passível de ser realizada a partir de distintas técnicas e observáveis conforme da precisão requerida. A obtenção das coordenadas de precisão milimétrica se dá mediante a fase de batimento da onda portadora, já a de ordem métrica com o uso da pseudodistância. Sendo que, se pode também utilizar ambas e obter uma alta precisão.

Haja vista o grau de exatidão das observáveis, deve-se escolher o tipo de receptor a ser utilizado uma vez que nem todos estão aptos a fornecer coordenadas precisas. Desta maneira, tem-se os receptores de navegação com precisão de métricas provindas da pseudodistância do código C/A; os receptores topográficos, os quais apresentam alta precisão e quando utilizado em conjunto com estações de referência são capazes de obter a fase da onda portadora L1 e o código C/A; e os receptores geodésicos que apresentam coordenadas de alta precisão visto a sua capacidade em rastrear a onda portadora em duas frequências (IBGE, 2008).

Dado que o elipsoide não possui significado físico, a altitude geodésica não tem relação com o campo de gravidade, por esta razão sua aplicação é restrita em alguns projetos de engenharia e demais que envolvam percurso da água.

4.5 Modelos Globais do Geopotencial e Modelo Oficial Brasileiro do Geoide

O advento tecnológico possibilitou o desenvolvimento em diversas áreas das ciências, melhorando os conceitos já arraigados e permitindo a sua exploração. Com os estudos da Terra não foi diferente, técnicas de posicionamento foram aperfeiçoadas dando origem a sensores orbitais capazes de determinar elementos como o geoide e seus derivados em alta resolução. Esse avanço tem incentivado pesquisas de cunho geodésico a fim de compreender os mecanismos da Terra e mitigar possíveis problemas.

Atualmente, missões espaciais como o *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer* (GOCE), *Laser Geometric Environmental Observation Survey* (LAGEOS) e *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) deram origem a soluções de longo alcance, capazes de determinar com precisão a gravidade, anomalia de altura, modelar o geoide, dentre outros. A partir destas informações juntamente a dados de modelos regionais, almeja-se monitorar as mudanças da Terra e produzir sistemas de referência geodésica com estabilidade a longo prazo e abrangência mundial (IAG, 2015).

4.5.1 Missão GOCE

Desde o início do lançamento dos primeiros satélites, a determinação do campo de gravidade global tem sido um dos maiores objetivos para subsidiar estudos de processos dinâmicos na superfície e no interior da Terra. Não diferente de outras missões, a missão GOCE, pertencente a *European Space Agency* (ESA), teve o intuito de melhorar significativamente a resolução do componente estático do campo de gravidade e modelar o geóide, permitindo a sua aplicação em diferentes áreas e progredir nas descobertas do funcionamento da Terra (DRINKWATER et al., 2006).

O satélite GOCE foi lançado em 17 de maio de 2009 (Figura 6), almejando determinar a anomalia do campo de gravidade da Terra com acurácia de 1 mGal , o geóide com superfície equipotencial para um oceano hipotético não perturbado com acurácia de 1-2 centímetros, e com o intuito de fornecer tais resultados com resolução espacial melhor que 100 quilômetros (DRINKWATER et al., 2002).

Figura 6- Satélite GOCE



Fonte: ESA (2017).

Para conquistar os objetivos da missão, GOCE continha componentes importantes e únicos. De acordo com ESA (1999), esse sensor foi capaz de mensurar o campo de gravidade em três dimensões espaciais sem a necessidade de direcioná-lo. Devido a isto, as observações do campo de gravidade da Terra têm três parâmetros complementares que não possui tendências direcionais, propiciando que componentes do campo de gravidade fossem

identificado em meio a outros componentes.

O gradiômetro eletrostático de gravidade, foi um dos diferenciais do GOCE responsável por mensurar as diferenças da aceleração por meio da massa de teste em três direções espaciais distintas dentro da espaçonave. Esse componente fez com que o sinal gravitacional de todas as massas atrativas da Terra que vão desde montanhas, vales, oceanos, zonas de subducção, dentre outros, fossem recebidos (ESA, 1999).

Uma outra técnica importante que esteve presente na missão GOCE foi o *Satellite-to-Satellite Tracking* (SST). Esse receptor que permitiu que fosse recuperado o campo de gravidade a partir da órbita não baseando somente nas perturbações, possibilitando que as irregularidades da órbita fossem transformadas em médio e longo comprimento de onda do campo de gravidade (JAMUR et al., 2010).

Em meio aos benefícios que a missão GOCE proporcionou, soluções baseadas em dados do satélite foram disponibilizadas e fazem parte atualmente dos melhores modelos do geopotencial juntamente com a combinação de informações de outras importantes missões.

4.5.2 EIGEN-6C4

Várias soluções a partir de combinação com outros modelos são frequentemente publicadas, uma das mais recentes e completas é pertencente a *European Improved Gravity Model of the Earth by New Techniques* (EIGEN). A solução EIGEN6-C4 tem o modelo do campo de gravidade combinado com quase todos dados recentes referente ao gradiômetro presente na missão GOCE, informações de dez anos da missão GRACE e dados da missão LAGEOS. Esta combinação garantiu que a solução fosse desenvolvida com grau e ordem de 1949, segundo Forste (2014). Já de acordo com Yilmaz et al. (2017), sua ordem e grau alcançou 2190. A combinação de diferentes satélites e superfícies tem sido feita por uma conjunção limitada de bandas de equações normais, as quais são geradas de observações para coeficientes harmônicos esféricos (SHAKO et al., 2013 apud KOSTELECKÝ, 2015).

4.5.3 GECCO

O modelo GECCO (*Goce and Egm2008 COmbination*) é também um modelo global de gravidade que foi gerado a partir da solução TIM R5 (*TIMe-wise Solution*). A solução tem como dados de entrada os coeficientes harmônicos esféricos com seus correspondentes desvios padrões da solução EGM2008 (*Experimental Gravity Field Model*), e os dados dos

coeficientes harmônicos esféricos advindos do GOCE TIM R5. As ondulações do modelo EGM2008 são processadas em um grid esférico global de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ de resolução onde é feito uma síntese dos coeficientes acima de 359 graus. Da mesma forma, o geoide do modelo GOCE é processado filtrando os coeficientes acima de 250 graus. Assim, os grids dos dois geoides são mesclados pelo ajustamento dos mínimos quadrados. Após a computação foi feito uma análise com graus acima de 359, e resultou-se o modelo GECO com coeficientes de 360 até 2190 graus semelhantes ao modelo EGM2008 (GILARDONI; REGUZZONI; SAMPIETRO, 2016). Em meio as vantagens da solução GECO, pode-se citar que regiões como as cordilheiras dos Andes e Himalaia se mostraram melhores modeladas quando é feito a comparação de todos os graus do modelo, tais áreas são caracterizadas por não possuir dados gravimétricos e estão acima de 280 graus.

4.5.4 XGM2016

O *Experimental Gravity Field Model* (XGM2016) é uma recente solução que visa trazer melhoras significativas em termos de resolução para a Geodésia. Esta inovação irá contribuir para importantes avanços, inclusive para a mudança do EGM2008 para o EGM2020 feito pela *United States National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) previsto para 2019.

Um dos destaques desse é modelo é o alcance da resolução máxima de $15' \times 15'$ no grid terrestre e o grau de 719 para os coeficientes harmônicos esféricos. Esse avanço somente foi possível graças a combinação de recentes dados terrestres com as últimas informações de gravidade, incluindo onze anos da missão GRACE, entre os anos de 2002 e 2013, a missão completa do GOCE, de 2009 a 2013. Um outro fator que diferencia o XGM2016 as demais soluções é a forma do seu processamento. Uma abordagem de peso foi aplicada permitindo a consideração individual de acurácia em cada dado altimétrico, e somente após atribuir pesos a esses dados é que se realiza a transição de dados modelando-as em cada célula de forma individual. A validação do modelo abordou diferentes métodos como a comparação com o modelo EGM2008, as redes de nivelamento/GPS, modelos de dados oceânicos da velocidade de correntes e com os refinados dados derivados de modelos da TNMM (PAIL et al., 2016).

4.5.5 MAPGEO2015

A necessidade de conhecer a altitude normal-ortométrica para a aplicação em obras de engenharia e mapeamento no Brasil, motivou a criação do modelo de ondulação geoidal MAPGEO2015. Para a sua criação, foi necessária coletar grande quantidade de dados

gravimétricos no Brasil e nos países vizinhos juntamente com parcerias de instituições como a Sub-Comissão da Gravidade e do Geoide da América do Sul (SCGGSA), com o Serviço internacional do Geoide (IGeS) apoiado pela IAG, e o IBGE. Tal união resultou na coleta de mais de 10 000 estações gravimétricas no território da Argentina, Chile, Paraguai e Uruguai (IBGE, 2015).

Dado a junção de informações, o modelo foi validado pelo programa DIVA desenvolvido na França (IBGE, 2015) e utilizou o Modelo Digital do Terreno (MDT) SAM3s_v2 (MATOS; BLITZKOW, 2008) baseado no *Shuttle Radar Topography Mission* SRTM (FARR et al., 2007). Esse MDT contribuiu com os valores das componentes verticais para o cálculo completo da anomalia de gravidade de Bouguer e de efeitos topográficos direto e indireto. Na região oceânica o modelo contou com anomalias advindas do *Danish National Space Center* (DTU10) e completou a grade de cinco minutos das anomalias ar livre médias. Recorreu-se também a transformada rápida de Fourier modificada do núcleo de Stokes desenvolvida por Featherstone, (2003) para estimar o curto comprimento de onda. Um outro componente importante para refinar o modelo foi o uso da solução EIGEN6C4 até o grau 200. Sua aplicação foi feita para reduzir os efeitos dos longos e médios comprimentos de onda da anomalia de Helmert e posteriormente realizar a sua reposição. Por fim, para atender pequenas áreas sem informação gravimétricas, aplicou-se o método de Redes Neurais Artificiais (RNA) em regiões com gravimetria suficiente (IBGE, 2015).

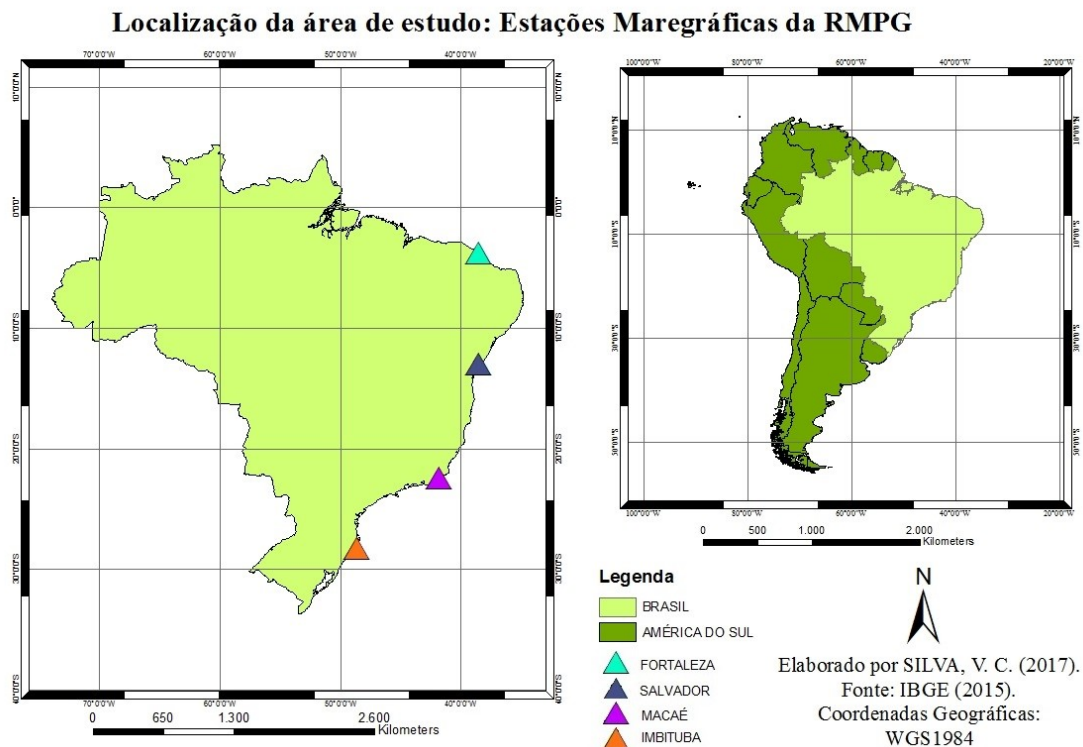
Ao avaliar o MAPGEO2015 por meio da altura geoidal provinda de algumas RRNN com várias conexões de nivelamento geométrico e conexões SAT, o modelo conforme o almejado, conseguiu refinar 20% a consistência de suas alturas geoidais comparada ao modelo MAPGEO2010 (IBGE, 2015).

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de Estudo

As EMs são compostas por diversos elementos de referência que são monitorados ao longo do tempo. As observações inconsistentes de tais níveis, são divulgadas pelo IBGE em seus relatórios, tornando inviável a execução do presente trabalho para toda RMPG. Sendo assim, estiveram elegíveis a participar deste estudo a estação de Salvador, localizada no Porto de Salvador, a estação de Fortaleza no Porto de Mucuripe, a recente desativada estação de Macaé no Terminal de Imbetiba e a estação de Imbituba, situada no Porto de Imbituba. A Figura 7 mostra o mapa de localização das respectivas estações de estudo.

Figura 7- Área de estudo.



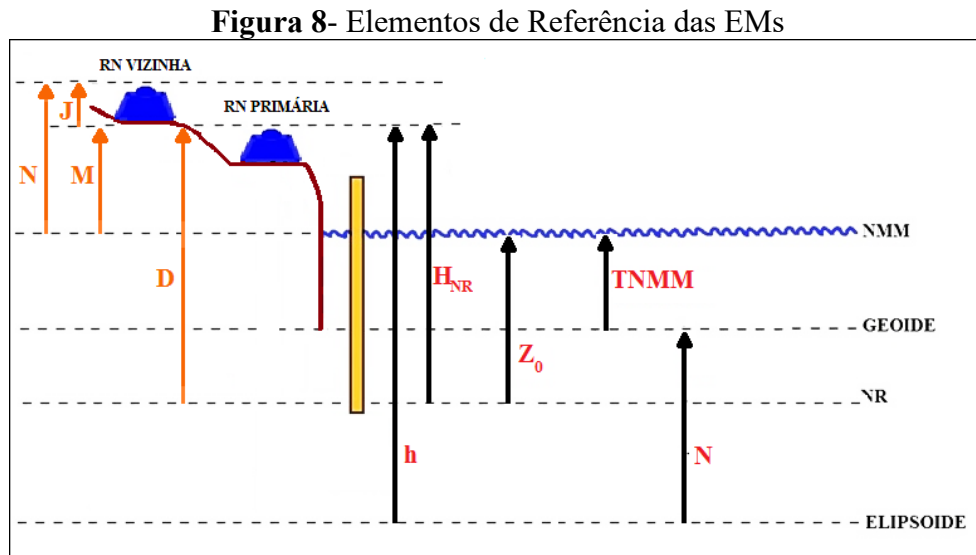
Fonte: O autor.

5.2 Níveis de Referência

Estimar a TNMM por meio da combinação de registros maregráficos e modelos do geopotencial, envolve uma série de parâmetros que são dependentes do tempo, da localização, principalmente da precisão de tais informações. Como já mencionado, a RMPG se trata de um sistema novo e atualmente possui ativa somente quatro EMs. As observações do NMM monitoradas pelo IBGE, possui até o momento menos de quinze anos processados e ainda algumas estações não apresentam dados devido falhas durante esse período, ou começaram a ser monitoradas tardiamente.

O ideal para a determinação da TNMM, é que as EM possuíssem um longo de período de coleta de dados, pois desta forma os efeitos dinâmicos poderiam ser eliminados visto que as marés estão sujeitas a variações sistemáticas causadas por 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). Assim, é preferível que as EM possuíssem dezenove anos de observações ou múltiplos aproximadamente, a fim de modelar os seus constituintes periódicos.

Fundamentado nas presentes informações disponíveis, para executar os cálculos da TNMM foi necessário realizar uma ampla análise nos níveis de referências que compõe cada estação maregráfica, disponibilizados pelo IBGE (2016), e nas Tábuas de Marés, concedidas pela DHM para associa-los a equação (1) estabelecida por Hayden et al. (2012). A Figura 8 ilustra na cor laranja os elementos utilizados do IBGE e da DHM para calcular a TNMM.



Fonte: Adaptado de IBGE (2015) e Hayden et al. (2012).

Os elementos em cor laranja exibidos na figura acima, especifica os níveis de referência utilizados pelo IBGE (2015), onde os mesmos determinam:

- J: Desníveis entre as referências de nível primária e vizinha determinado pelo nivelamento CGEM.
- 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 primeiro elemento necessário ao cálculo (1), é a altitude elipsoidal da RN primária de cada estação maregráfica. O IBGE (2015), divulga em meio aos dados, os códigos das RNs primárias, assim, por meio do Banco de Dados Geodésicos (BDG) disponibilizados na URL <<http://www.bdg.ibge.gov.br/appbdg/>> foi possível consultar o relatório das mesmas. Entretanto, somente as EM de Macaé e Salvador apresentaram o h elipsoidal. Logo, para se

chegar ao h (Tabela 1) das demais estações, recorreu-se a equação (16), onde buscou para as EMs de Fortaleza e Imbituba RNs próximas que apresentavam H ortométrico e h elipsoidal. Desta forma, pelos desníveis entre elas obteve-se a h elipsoidal das estações primárias.

$$h_1 - h_2 = (H_1 - H_2) + (N_1 - N_2) \quad (16)$$

Tabela 1- Código e altitude elipsoidal das RNs primárias das EM

Estações Maregráficas	h (m)
FORTALEZA	-5,3663
SALVADOR	-8,6610
MACAÉ	-3,4080
IMBITUBA	3,3539

Fonte: IBGE, 2017/ O autor.

A RN primária de Fortaleza, 4336-A, foi implantada em 2011 pelo IBGE e é utilizada para o transporte de níveis, porém o seu relatório ainda não consta no BDG. Por outro lado, a antiga RN primária de Fortaleza (9320-P) está presente no BDG. Assim, para obter a h da RN 4336-A, acrescentou-se o desnível de 0,062 m determinado pelo IBGE entre as mesmas, na altitude elipsoidal da RN 9320-P que foi calculada por meio da equação (16).

O próximo elemento de referência para se calcular a TNMM, é o H_{NR} , o qual se refere a altura elipsoidal da RN primária acima do NR. Esse dado é fornecido pela DHN por meio da tábua de marés e monitorado e atualizado pelo IBGE2015, onde é denominado como nível D, como mostrado na Figura 8. Os valores correspondentes a esse elemento podem ser vistos na tabela 2 a seguir.

Tabela 2- Altura da RN primária acima do nível de redução

Estações Maregráficas	H_{NR} (m)
FORTALEZA	4,7890
SALVADOR	3,2650
MACAÉ	4,1970
IMBITUBA	2,4060

Fonte: IBGE, 2016 e CHM, 2017.

A estação de Macaé não apresenta o dado referente a alguns elementos que a compõe devido uma mudança na régua linimétrica (DHM, 2013). No entanto, para determinar o nível D, apenas necessita-se da distância entre o NR e a RN primária. Sendo assim, utilizou-se o valor

da tábua de marés referente ao Terminal de Imbetiba, da estação de Macaé, disponibilizado pela DHN.

O elemento Z_0 , o qual refere-se a distância entre o NR e NMM, foi calculado a partir de outros níveis disponibilizados pelo IBGE (2015). Segundo os níveis geométricos das EM apresentados na Figura 8, pode-se determinar Z_0 por meio da subtração entre o nível D (altura da RN primária acima do NR) e M (altura da RN primária acima do NMM local). Contudo, o relatório da RPMG não fornece diretamente o nível M, porém é passível calculá-lo subtraindo o nível P (altura da RN vizinha acima do NMM local) pelo nível J (desníveis entre as RRNN primária e vizinha). Efetuando estas relações obteve-se o parâmetro Z_0 (Tabela 5).

Tabela 3- Altura entre o NR e o NMM local

Estações Maregráficas	Z_0 (m)
FORTALEZA	1,5568
SALVADOR	1,2921
MACAÉ	1,0433
IMBITUBA	0,4672

Fonte: IBGE, 2016.

5.3 Altura Geoidais

O elemento referência N exposto na equação (1) refere-se à ondulação geoidal ou o valor do geoide. Esse, pode ser fornecido pelos modelos globais do geopotencial e por modelos nacionais como o MAPGEO2015.

Para efetuar o cálculo do N pelos modelos globais, visitou-se a plataforma ICGEM pela URL <<http://icgem.gfz-potsdam.de/home>> na aba *Calculation Service* e modificou-se as configurações necessárias. Foi escolhido os modelos EIGEN-6C4, GECO, XGM2016, 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*, este corresponde também de forma aproximada a anomalia de altura somada a topografia (ICGEM, 2017). O sistema de referência utilizado foi o WGS84, e em seguida selecionou-se o termo de grau zero para adequar o geoide 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, visando eliminar todos os efeitos de maré, embora em prática não seja possível. Na aba de seleção de grid foi inserido as coordenadas da RN primária de cada estação, e desta forma calculou-se o N para os modelos

EINGE-6C4, GECO, XGM2016 (Tabela 2).

Tabela 4 - Valor de N dos modelos globais do geopotencial para as EMs (metros)

Estações Maregráficas	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
FORTALEZA	-8,6384	-8,6753	-8,6870
SALVADOR	-10,7211	-10,7065	-10,7368
MACAÉ	-6,3496	-6,4981	-6,4310
IMBITUBA	1,6849	1,6690	1,7019

Fonte: O autor.

O cálculo do N para o modelo oficial brasileiro do geoide foi feito a partir do aplicativo disponibilizado pelo IBGE. Os valores foram obtidos apenas com a inserção das coordenadas de latitude e longitude das EM (Tabela 3).

Tabela 5 - Valor de N do modelo oficial do geoide para as EMs (valores em metros)

Estações Maregráficas	N MAPGEO2015
FORTALEZA	-8,9400
SALVADOR	-10,9400
MACAÉ	-6,7700
IMBITUBA	1,2500

Fonte: IBGE, 2017.

5.4 Método

Com os elementos da equação já determinados, realizou-se o cálculo da TNMM para cada N do modelo do geopotencial, mantendo os demais parâmetros. Desta forma, obteve-se a TNMM para os modelos GECO, EIGEN-6C4, XGM2016 e MAPGEO2015 de todas as EMs de estudo.

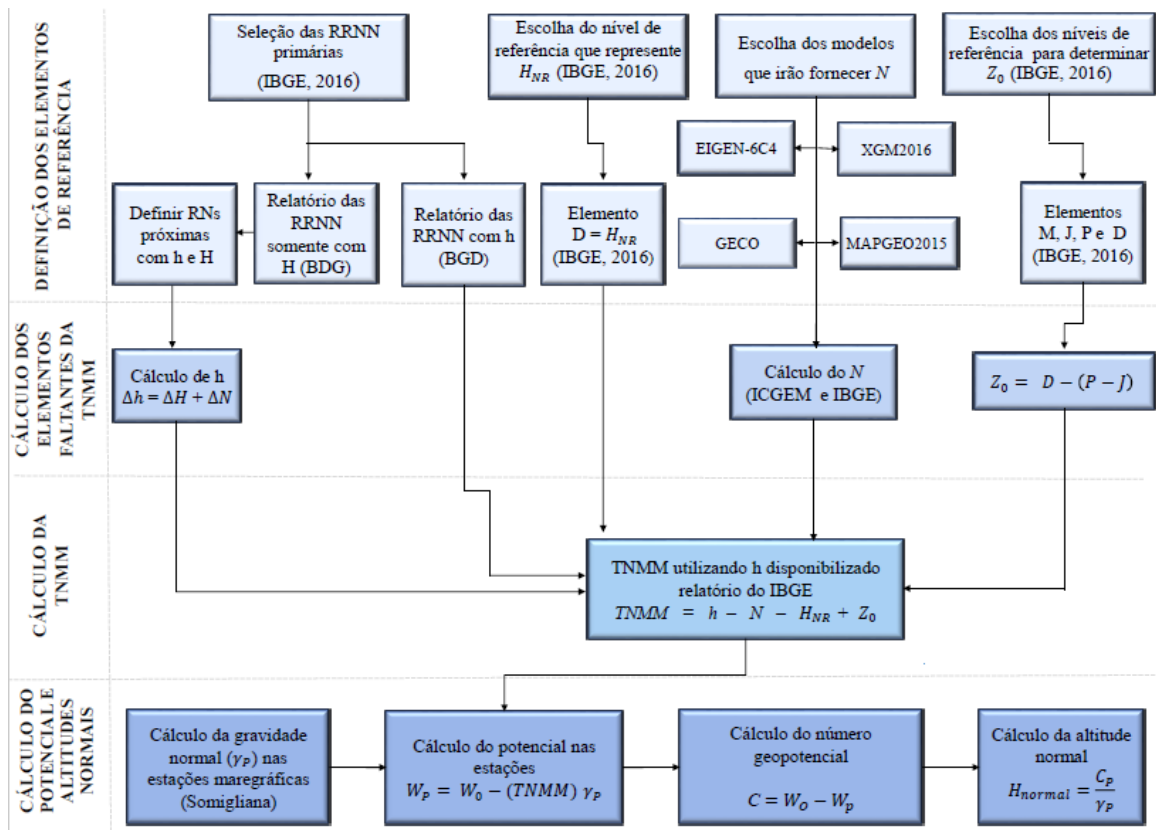
Posteriormente, para determinar a TNMM em termos do potencial, realizou o cálculo da equação (2) para todos os valores de TNMM calculados anteriormente e utilizou como parâmetro o valor de W_0 , calculado globalmente, sendo esse $62636853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. Um outro elemento da equação (2) calculado, foi a gravidade normal γ . Para determiná-la utilizou na equação (3), as 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 6 exhibe os valores encontrados para a gravidade normal.

Tabela 6- Valores obtidos da gravidade normal nas EM

Estações Maregráficas	Gravidade Normal (mGal)
FORTALEZA	978.054,347
SALVADOR	978.292,972
MACAÉ	978.782,015
IMBITUBA	979.189,090

Fonte: O autor.

A partir dos valores de potencial W_P calculados nas EMs, determinou-se o valor do número do geopotencial para cada ponto de interesse por meio da equação (5), e a posteriori os novos valores de altitude normal foram estabelecidos com a inserção da TNMM pela equação (13). O fluxograma da Figura 9 exibe melhor a metodologia executada.

Figura 9- Processos realizados para o cálculo do potencial e altitudes normais.

Fonte: O autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores obtidos para a TNMM calculados utilizando os modelos GECO, EIGEN-6C4,

XGM2016 e MAPGEO2015 para as EMs de estudo podem ser vistos na Tabela 7.

Tabela 7- TNMM das EMs calculada por diferentes modelos (metros)

EMs	MAPGEO2015	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
Fortaleza	0,3415	0,0399	0,0768	0,0885
Salvador	0,3061	0,0872	0,0726	0,1029
Macaé	0,2083	-0,2121	-0,0636	-0,1307
Imbituba	0,1651	-0,2698	-0,2539	-0,2868

Fonte: O autor.

Percebe-se que para a estação de Imbituba, onde é adotado o referencial zero de altitude, a TNMM para os modelos globais do geopotencial ficaram em torno de 0,25 a 0,28 m negativo, ao passo que pelo MAPGEO2015 a TNMM foi de aproximadamente 0,16 m.

É importante ressaltar que os modelos globais do geopotencial e o modelo oficial do geoide não apresenta compatibilidade nos dados. Enquanto que os modelos globais são fundamentados em uma série de parâmetros que envolve gravimetria por satélites e dados terrestres de todo o globo, o MAPGEO2015 apesar dados da solução EIGEN-6C4 e dados gravimétricos do continente sul americano, não apresenta informações gravimétricas marinhas, o que pode causar inconsistência dos dados na região litorânea. Entretanto, existe diversos estudos que comprovam a sua boa performance comparada as redes de nivelamento e conexões GNSS, como Blitzkow et al. (2016) e Ferraz et al. (2017). Em razão deste fato, é interessante que estudos sejam executados com ambos os tipos de modelos a fim de compará-los haja vista a sua importância e a existência de pesquisas que comprovam a melhoria da precisão desse modelo em relação aos anteriores.

Considerando os erros presentes em cada observação, era desejável que h fosse obtido somente pelo relatório das RRNN visto que os erros aumentam à medida que se adota valores provindos de modelos e propaga-os para as demais observações ao realizar cálculos. Por outro lado, os valores de TNMM se tratam de uma aproximação admitindo assim que os parâmetros do cálculo contêm incertezas.

Um estudo desenvolvido por Hayden (2013, p. 132), buscou comparar a TNMM obtida por meio da avaliação geométrica dada pela equação (1), com a TNMM obtida por diversos modelos oceânicos locais e globais, e concluiu que os resultados são dependentes da escolha do modelo do geopotencial. Para o modelo GOCO03s (*Gravity Observation Combination*) com grau e ordem 180 a discrepância chegou a um metro, já para os modelos CGG2010 (*Canadian Gravimetric Geoid Model*) e GOCO03s +EGM2008, com grau e ordem superior, o desvio

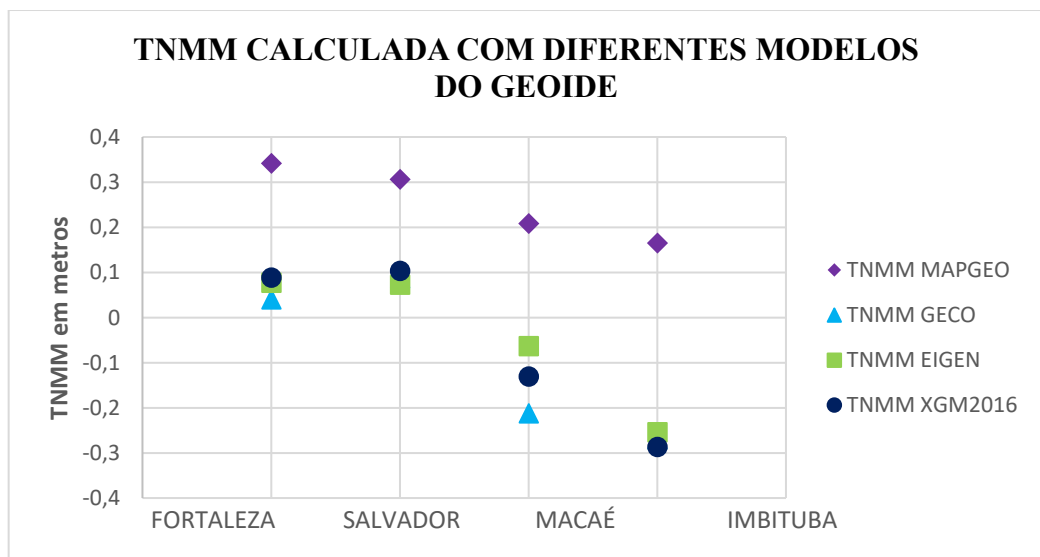
máximo foi de 0,5 metros.

Comumente os modelos oceânicos mais recentes e os modelos globais do geopotencial possuem em sua composição dados semelhantes, o que pode favorecer a aproximação dos dados. Contudo, sabe-se que as resoluções dos modelos são determinantes para a sua precisão, sendo que quanto maior o grau e ordem dos mesmos, melhor será modelado a superfície. Comparando o grau e ordem dos modelos analisados, é válido lembrar que a solução EIGEN-6C4 presente no modelo brasileiro oficial do geóide possuiu somente grau e ordem 200. No entanto, em sua composição pode haver mais informações gravimétricas terrestre que melhor modela o Brasil que os modelos globais.

A partir de filtragens da missão feita pelo satélite TOPEX POSEIDON em 2005, Lopes (2010, p. 42) apresentou a topografia dinâmica em seu estudo utilizando modelos do geopotencial, como EIGEM-5C, EGM2008 e EGM 1996, e obteve a TNMM em torno de -0,3 a 0,5 metros para toda faixa do oceano atlântico no Brasil. Baseando nesse estudo, os valores calculados de TNMM para as estações são consistentes pois se encontram dentro do intervalo apresentado por Lopes (2010), utilizando modelos e metodologias diferentes.

Perceba por meio da Figura 10 a discrepância entre os dados da TNMM para cada modelo. Veja que a diferença é superior para o modelo brasileiro oficial do geóide.

Figura 10 – TNMM obtida com diferentes alturas geoidais.



Fonte: ICGEM (2017) e IBGE (2017).

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, bem como Hayden, (2013) destacou. As diferenças obtidas em metros,

tanto entre os valores de N e valores de TNMM, estão na Tabela 8.

Tabela 8- Comparação dos valores de N e TNMM nas EMs de estudo (valores em metros)

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	0,3016	0,2189	0,4204	0,4349
EIGEN-6C4 / MAPGEO2015	0,2647	0,2335	0,2719	0,4190
XGM2016 / MAPGEO2015	0,2530	0,2032	0,3390	0,4519

Fonte: O autor.

Um dos motivos pelo qual os modelos globais do geopotencial utilizados se aproximam ao determinar a altura geoidal, se deve ao fato que são baseados em grande parte nas soluções advindas da missão GOCE. Dentre os modelos analisados, GECO possui em sua composição o modelo EGM2008, considerado o modelo que apresenta maior resolução em termos de campo de gravidade e ainda foi completado com dados da missão GOCE para melhorar a acurácia em áreas com baixa e média frequência que antes não eram bem modeladas. Já o modelo EIGEN-6C4, apresenta soluções provindas das missões GRACE, LAGEOS, GOCE, dados do geoide do oceano (DTU12) e ainda altura geoidal do EGM2008. GECO e EIGEN-6C4 foram processados com a mais alta resolução, e de acordo com pesquisas, apresentaram pela raiz do erro médio quadrático uma diferença de aproximadamente 0,13 metros na América do Sul (GILARDONI; REGUZZON; SAMPIETRO, 2016, p. 241). Observando a Tabela 8 acima, nota-se que na estação de Macaé este valor foi excedido em somente 1,8 cm.

O recente modelo global do geopotencial XGM2016, assim como outras soluções, foi processado com as mais avançadas técnicas e informações além de dados gravitacionais de onze anos da missão GRACE e toda missão GOCE. De acordo com Nicacio e Dalazoana, (2016) este modelo mostrou uma ligeira melhora com relação ao EIGEN-6C4 no Brasil, analisando a raiz do erro médio quadrático, os modelos se diferenciam em cerca de seis centímetros. Tal discrepância também é apresentada na estação de Macaé, conforme a Tabela 8, onde a diferença chegou a 6,71 cm.

A partir dos valores de gravidade normal, W_0 e de TNMM, foi calculado o potencial em cada estação maregráfica em m^2/s^2 . A Tabela 9 mostra os valores de potencial encontrados para a TNMM.

Tabela 9 - W_p nas EMs (m^2/s^2)

EMs	MAPGEO2015	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
Fortaleza	62636850,06	62636853,01	62636852,65	62636852,53
Salvador	62636850,41	62636852,55	62636852,69	62636852,39
Macaé	62636851,36	62636855,48	62636854,02	62636854,68
Imbituba	62636851,78	62636856,04	62636855,89	62636856,21

Fonte: O autor.

Assim como os valores obtidos de SST, os valores do W_0 do modelo MAPGEO2015 se diferenciou consideravelmente dos outros modelos, chegando a discrepância máxima de 4,43 m^2/s^2 em Imbituba com o modelo XGM2016. O comportamento entre as demais se encontra similar aos estudos que calculam o potencial utilizando diferentes modelos do geoide e estudos com metodologias diferentes.

Tocho e 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 a 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 . Por outro lado, Hayden, (2013), determinou o potencial para o Canadá utilizando a SST 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 9, 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 3,6 m^2/s^2 entre as estações de Fortaleza e Imbituba pelo modelo XGM2016.

Por meio do potencial e a gravidade normal, obteve os seguintes valores para o número geopotencial das estações (Tabela 10).

Tabela 10 - Números Geopotenciais das EMs de acordo com modelos do geoide

EMs	MAPGEO2015	GECO	EIGEN-6C4	XGM2016
Fortaleza	3,3401	0,3901	0,7511	0,8653
Salvador	2,9946	0,8531	0,7100	1,0070
Macaé	2,0388	-2,0757	-0,6225	-1,2791
Imbituba	1,6166	-2,6414	-2,4860	-2,8084

Fonte: O autor.

Observa-se que os modelos globais do geopotencial apresentaram números negativos para as estações de Macaé e Imbituba, enquanto que todos os valores foram positivos para o modelo MAPGEO2015. Embora números geopotenciais negativos sejam aceitáveis, é necessário que estudos sejam feitos para investigar a ocorrência destes somente para modelos do geopotencial. Um dos fatores que pode ser estudo é a diferença entre os sistemas de marés, visto que o ideal seria a aplicação do sistema zero tide, conforme as resoluções do IAG (2015) impõem.

Posteriormente, utilizando a equação (13) calculou-se as altitudes normais para o modelo do MAPGEO2015 (Tabela 11), a fim de compará-los com a altitude ortométrica advinda dos relatórios das RRNN primárias.

Tabela 11 - Altitude normal para o modelo MAPGEO2015 (valores em metros)

EMs	MAPGEO2015
Fortaleza	3,4150
Salvador	3,0610
Macaé	2,0830
Imbituba	1,6510

Fonte: O autor.

Como já mencionado a altitude normal é uma altitude física criada devido à complexidade de se determinar a ortométrica, sendo assim, se trata de uma aproximação. Os valores de altitude normal-ortométrica presente nos relatórios correspondem a um valor nivelado que pode apresentar inconsistências. Já o cálculo de altitude normal executado, envolve valores de TNMM que as altitudes ortométricas não possuem. Desta forma, os valores devem apresentar somente uma aproximação uma vez que determinam valores de sentido físico, porém possuem parâmetros diferentes para a sua determinação.

As altitudes ortométricas presentes nos relatórios das RRNN primárias estão na Tabela 12.

Tabela 12 – Altitudes normal-ortométricas das RRNN primárias

EMs	Fortaleza	Salvador	Macaé	Imbituba
H ort (m)	3,5167	2,2087	3,1090	2,0354

Fonte: IBGE (2017).

Todas as estações de estudo apresentaram um valor de altitude normal

consideravelmente próximo da altitude ortométrica. Dentre estes, a discrepância maior foi na estação de Macaé chegando a 1,02 m, o que pode ser explicado pela inserção da TNMM ao cálculo e em partes aos erros inerentes aos parâmetros utilizados. A fim de estimar o desvio padrão das variáveis, espera-se que no futuro haja informações a respeito da qualidade de cada dado presente no cálculo. Somente assim, será possível realizar o controle de qualidade das observáveis.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude das recentes resoluções da IAG, as quais impõem que os novos sistemas de altitude sejam baseados em parâmetros físicos que requerem a determinação da TNMM, é necessário que estudos com metodologias alternativas, como o apresentado, sejam desenvolvidos uma vez que há a carência desta informação no Brasil.

A metodologia aplicada às estações, demonstrou satisfatória para a determinação da TNMM posto que os valores encontrados se diferiram no máximo em 0,3 metros aproximadamente do estudo realizado por Lopes (2010), que filtrou modelos oceânicos na região do litoral do Brasil, sendo esta uma diferença desprezível uma vez que a TNMM é dinâmica.

Visto que os valores das alturas geoidais estão entre de 0,01 a 0,45 m para todos os modelos, ficou evidente que é essencial a escolha de modelos de alta resolução que representem a superfície equipotencial de forma precisa para execução de cálculos. Do mesmo modo, é importante também que os níveis de referência sejam obtidos de forma padrão juntamente com as incertezas de cada elemento a fim de definir a qualidade da TNMM e o potencial calculado.

Os valores dos potenciais nas estações se mostraram dentro do padrão de estudos realizado em outros países, pois a diferença máxima do potencial entre as estações foi em torno de três metros para todos os modelos. Contudo, para que em breve as altitudes sejam baseadas neste referencial, é necessário que haja um número maior de EMs monitoradas pela RMPG e dispostas uniformemente ao longo da costa. Assim, possibilitará o cálculo de números geopotenciais consistentes e a eliminação de erros nos referenciais utilizados, conforme o proposto por Hayden, (2013) para o Canadá.

Recomenda-se ao IBGE que os elementos que envolve as EMs sejam monitorados e divulgados por completo. Para que estudos sejam executados, é primordial que exista informações como a altitude geométrica nas principais RRNN que são a base para a altitude no Brasil, assim como a publicação dos relatórios de RRNN primárias substituídas no BDG. Uma

vez que o presente estudo envolve parâmetros da crosta que ainda são desconhecidos, propõem-se que haja a inclusão de modelos de cargas oceânicas que estimem a movimentação da TNMM ao longo dos anos.

Apesar da impossibilidade de gerar resultados concisos devido às incertezas contidas nas observações e a indisponibilidade de forma padrão dos mesmos, o presente trabalho poderá contribuir para futuras comparações acerca de novos estudos a serem desenvolvidos com o propósito similar a este.

REFERÊNCIAS

- BLITZKOW, D. et al. **MAPGEO2015: O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil**. Revista Brasileira de Cartografia. São Paulo, 2016.
- DALAZOANA, R. et al. **Controle Vertical das RRNN e da Posição Geocêntrica do Marégrafo No Porto De Imbituba**. IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas. Curitiba, 2005. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2005_Control_Verticaldas_RRNN_e_Pos_Vert_do_Mareg_Imbituba.pdf> Acesso em: 14 maio, 2017.
- DIRETORIA DE HIDROGRAFIA E NAVEGAÇÃO (DHN). **Descrição De Estação Maregráfica**. Disponível em <<http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-estacoesmaregraficas/estacaomare.html>> Acesso em: 15 maio, 2017.
- DRINKWATER, M. R. **GOCE: ESA's first Earth Explorer Core mission**. Italy, 2002. Disponível em <<http://earth.esa.int/goce04/Documents/From-Sensors-to-Earth-Science_ISSI_Mar03.pdf>> Acesso em: 18 maio, 2017.
- DRINKWATER, M.R. et al. **The GOCE Gravity Mission: Esa's First Core Earth Explorer**. Italy, 2006. Disponível em <http://earth.esa.int/goce04/Documents/From-Sensors-to-Earth-Science_ISSI_Mar03.pdf> Acesso em: 20 maio, 2017.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. **GOCE**. [S.I.], 2017. Disponível em: <http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE> Acesso em: 05 maio, 2017.
- _____. **Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission**. [S.I.], 1999. Disponível em <<https://earth.esa.int/documents/10174/1600851/vol1.pdf>> Acesso em: 08 maio, 2017.
- FARR, T. G. et al. **The Shuttle Radar Topography Mission, Reviews of Geophysics**, 45, RG2004, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Diretoria de Geociências – DGC Coordenação de Geodésia – CGED. 2007. Disponível em: <<http://www.agu.org/journals/rg/rg0702/2005RG000183/>>. Acesso em 25 ago. 2017.
- FEATHERSTONE, W. E. **Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination**. Computer & Geosciences, 29, 183-193.2003.
- FERRAZ, S. R. et al. **Análise da avaliação absoluta de modelos de ondulação geoidal e do geopotencial no município de Porto Alegre- RS**. IV Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente, 2017.
- FORSTE, C. et al. **EIGEN-6C4 – The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 1949 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse**. Geophysical Research Abstracts, 2014. Disponível em: <<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-3707.pdf>> Acesso em: 15 maio, 2017.
- FREITAS, S.R.C; BLITZKOW, D. **Altitudes e Geopotencial**. IGeS Bulletin N.9. International Geoid Service, June 1999, 47 – 62, Milan. Disponível em : <

<http://www.cartografica.ufpr.br/home/wp-content/uploads/2013/10/Altitude-e-Geopotencial.pdf> > Acesso em: 05 maio, 2017.

GILARDONI, M.; REGUZZONI, M.; SAMPIETRO, D. **GECO: a global gravity model by locally combining GOCE data and EGM2008**. Italy, 2016. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/260134448_Combining_EGM2008_with_GOCE_gravity_models> Acesso em: 15 maio 2017.

HAIGH, I., ELIOT, M., & PATTIARATCHI, C. **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, [C06025]. DOI: 10.1029/2010JC006645. 2011.

HAYDEN, T. et al. **Evaluation of W0 in Canada using tide gauges and GOCE Gravity Field models**. Journal of Geodetic Science. Canadá, 2012. Disponível em <<https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/jogs.2012.2.issue-4/v10156-012-0003-9/v10156-012-0003-9.pdf>> Acesso em: 05 maio, 2017.

HAYDEN, T. T. **Geopotential of the Geoid-Based North America Vertical Datum**. 2013.197f. Dissertation (Master of Science). Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta, 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de Dados Geodésicos**. 2017. Disponível em :< <http://www.bdg.ibge.gov.br/appbdg/>> Acesso em 20 ago. 2017.

_____. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015**. 2015. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf>. Acesso em:15 set. 2017.

_____. **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG2001/2015**. Rio de Janeiro, 2016. Disponível em<ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf> Acesso em: 05 maio, 2017.

_____. **Esclarecimento sobre a relação entre o Datum Vertical do SGB (Imbituba e Santana) e os Níveis de Redução e “Zeros” Hidrográficos no Litoral Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em:<ftp://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/outros_documentos_tecnicos/rmpg/relacao_dvsqb_nr_zh.pdf> Acesso em: 15, maio 2017.

_____. **Recomendações para Levantamentos Relativos Estáticos – GPS**. Rio de Janeiro, 2008.

_____. **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm> Acesso em 01 maio, 2017

_____. **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012**. Rio de Janeiro, 2013.

Disponível em

<ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2013_GRRV.pdf> Acesso em: 05 maio, 2017.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). **IAG Resolution (No. 1) for definition and realization of an International Height Reference System (IHR)**. Prague, Czech Republic, 2015.

INTERNATIONAL CENTRE for GLOBAL EARTH MODELS (ICGEM). 2017. Disponível em :< <http://icgem.gfz-potsdam.de/calc>> Acesso em: 25 ago., 2017.

JAMUR, K. P.; MELO, L. F. S.; FREITAS, S. R. C.. **Avaliação dos modelos de gravidade terrestre advindos da missão GOCE – Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer**. Universidade Federal do Paraná (UFPR). Novembro. 2010. In: 42 Reunión del Consejo Directivo del Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Disponível em:<http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol15/46a_Jamur_et_al_evaluacion_modelos_GOCE.pdf>. Acesso em 10 de maio, 2017.

JEKELI, C. **Heights, the Geopotential, and Vertical Datums**. Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science. Ohio State University. Ohio, 2000. Disponível em < http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~mkuhar/Zalozba/Heights_Jekeli.pdf > Acesso em: 05 maio, 2017.

KOSTELECKY, J. et al. **Evaluation of the gravity field model EIGEN-6C4 in comparison with EGM2008 by means of various functions of the gravity potential and by GNSS/levelling**. Research Institute of Geodesy, Topography and Cartography. Czech Republic, 2015. Disponível em <<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/gi/article/view/gi.14.1.1/2824>> Acesso em: 05 maio, 2017.

LOPES, B. A. **O Geóide Gravimétrico e o Nível Médio Do Mar na Região do Datum Altimétrico Brasileiro: Um Estudo Comparativo**. 2006. 97. Dissertação, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em < <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp022438.pdf> > Acesso em: 05 maio, 2017.

_____. **A utilização de modelos geoidais e altimetria por satélite no estudo das variabilidades no nível do mar e correntes geostróficas no Atlântico Sul e região da Confluência Brasil Malvinas**. 2010. 118 f. Tese (Oceanografia Física)- Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LUZ, R. T. **Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS**. xxi, 2008. 179 p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), CPGC G/UFPR, Curitiba. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/handle/1884/17075>> Acesso em : 20 ago., 2017.

_____; GUIMARÃES, V.M. **Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE**. III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, maio/2003, Curitiba, PR.

_____; FREITAS, S.R.C.; DALAZOANA, R. **Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro**. VII Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra, octubre/2002, Santiago,

Chile. Disponível em < http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2002-Acompanhamento_Imbituba_atraves_Redes_SGB.pdf > Acesso em: 05 maio, 2017.

_____; GUIMARÃES, V.M. **Realidade e Perspectivas da Rede Altimétrica de Alta Precisão do Sistema Geodésico Brasileiro**. II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, maio/2001, Curitiba, PR. Disponível em <http://www.ibge.com.br/home/geociencias/geodesia/artigos/2001-Realidade_e_Perspectivas_da_RAAPSGB.pdf> Acesso em: 05 maio, 2017.

MATOS, A.C.O.C.; BLITZKOW, D. **Modelagem Digital de Terrenos (MDT) de 3" para a América do Sul Pos-Doc Report** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MORITZ, H. **Advanced physical geodesy**. Karlsruhe: Wichmann, 1980.

NICACIO, E.; DALAZOANA, R. **Passado e Presente dos Modelos Globais do Geopotencial: Uma Abordagem Conceitual Sobre sua Evolução**. Revista Eletrônica Multidisciplinar FACEAR. ISSN: 2316-2317. 2016.

ODUMOSU, J.O. et al. **Evaluation of the various orthometric height systems and the Nigerian scenario – A case study of Lagos State**. Journal of King Saud University – Engineering Sciences. 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jksues.2015.09.002> > Acesso em : 18 dez. 2017.

PAIL, et. al. **The Experimental Gravity Field Model XGM2016**. Germany, 2016.

SANCHÉZ, L. **Strategy to Establish a Global Vertical Reference System**. Germany, 2009.

SNEEUW, N. **Height Systems**. Lecture notes on Geodesy. 2013. Disponível em :< <http://folk.uio.no/treiken/GEO4530/HeightSystemsSneeuw.pdf> > Acesso em: 18 dez. 2017.

SILVA, L.M.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. **Análise de Séries Temporais Maregráficas Correlacionadas com Observações GNSS no Datum Vertical Brasileiro De Imbituba-Sc**. Revista Brasileira de Cartografia (2016) N0 68/1: 73-90. Curitiba, 2016. Disponível em:< <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/1090/899> > Acesso em: 15 maio, 2017.

SILVA, L.M.; FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. **Análise de Séries Temporais Maregráficas Correlacionadas com Observações GNSS no Datum Vertical brasileiro De Imbituba-Sc**. Revista Brasileira de Cartografia (2016) N0 68/1: 73-90. Curitiba, 2016. Disponível em:<<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/1090/899>> Acesso em: 15 maio, 2017.

SOUZA, D.V. **Avaliação de distorções da rede altimétrica fundamental no sul/sudeste do Brasil usando o geóide e GPS**. Dissertação (Mestrando em Geofísica). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://iag.usp.br/pos/sites/default/files/Deborah%20Valandro%20AVALIA%C3%87%C3%83O%20DE%20DISTR%C3%87%C3%95ES%20DA%20REDE%20ALTIM%C3%89TRICA%20FUNDAMENTAL%20NO%20S.pdf> > Acesso em: 05 maio, 2017.

TOCHO, C.; VERGOS, G.S. **Estimation of the geopotential value W0 for the Local Vertical Datum of Argentina using EGM2008 and GPS/Levelling data.** Argentina, 2016.

VANÍCEK, P.; KRAKIWSKY, E. J. (1986) **Geodesy: the Concepts.** 2. ed., 6. print. Amsterdam: Elsevier. xv, 697 p.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia.** UFPR – Curso de Engenharia Cartográfica, 2007. Disponível em <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/topo2/apos_topo.pdf> Acesso em: 05 maio, 2017.

YILMAZ, M. et al. **Evaluation of Recent Global Geopotential Models By Gns/Levelling Data: Internal Aegean Region.** Turkey, 2016. Disponível em <<http://www.istanbuluniversitesi.dergipark.gov.tr/download/article-file/267578> > Acesso em: 05 maio, 2017.

YILMAZ, N. **Comparison of different height systems.** Department of Geodesy and Photogrammetry Engineering, Karadeniz Technical University, 61040, Trabzon, Turkey, 2008. Disponível em <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1007/s11806-008-0074-z> > Acesso em: 05 maio, 2017.