

Determinação da topografia do nível médio do mar com altimetria por satélites

RESUMO

A Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM) é o afastamento entre o Nível Médio do Mar (NMM) e o geóide. A TNMM resulta de diversos fatores meteorológicos e oceanográficos e este efeito faz com que o Nível Médio dos Mares (NMMs) locais ao longo da costa não fiquem na mesma superfície equipotencial. Nas últimas décadas vários estudos foram desenvolvidos com base em dados da Altimetria por Satélites (ALTSAT). O objetivo deste trabalho foi demonstrar a metodologia de cálculo da TNMM através de ALTSAT e a determinação da TNMM da estação maregráfica de Salvador - BA e de Imbituba - SC para efeito de comparação. Utilizou-se para o cálculo o modelo Global Mean Dynamic Topography - MDT_CNES_CLS13, onde obteve-se para Salvador uma TNMM de $55,5 \pm 0,6$ cm e para Imbituba uma TNMM de $51,5 \pm 1,3$ cm. Portanto, verifica-se que a diferença entre o NMM do Datum Vertical Brasileiro (DVB) e a estação maregráfica de Salvador é de $4,0 \pm 1,4$ cm determinado com base em observações do satélite altímetro Jason-1 modelado pelo MDT_CNES_CLS13.

PALAVRAS-CHAVE: TNMM. Rede Altimétrica. Altimetria por Satélite.

Vania Pereira Reis

vania_reis@ymail.com
orcid.org/0000-0002-4429-7972
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Luiz Guimarães Barbosa

luizgbarbosa@gmail.com
orcid.org/0000-0001-8958-9023
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Alessandra Svonka Palmeiro

aspalmeiro@yahoo.com.br
orcid.org/0000-0003-2575-6720
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

INTRODUÇÃO

Antigamente pensava-se que o Nível Médio do Mar (NMM) determinado ao longo de um grande período de tempo, ou seja, por volta de 19 anos, tivesse uma diferença desprezível com o geóide, mas com a condução do nivelamento de alta precisão ao longo da costa e conectado aos marégrafos locais verificou-se diferenças significativas entre os NMMs locais, concluindo que existe uma separação entre tais superfícies e o geóide, denominado de Topografia do Nível Médio do Mar (TNMM).

A TNMM faz com que o NMM ao longo da costa do Brasil não fique na mesma superfície equipotencial. Assim não se pode usar o NMM ao longo da costa como inunção para a rede altimétrica. Este é o motivo que toda a rede vertical brasileira está referenciada ao *Datum* Vertical de Imbituba – SC, sendo que a propagação de erros aumenta conforme as Referências de Nível (RRNN) se afastam do *Datum*.

Sabe-se que a TNMM resulta de diversos fatores meteorológicos como a diferença de expansão volumétrica com origem térmica (“efeito estérico”) e oceanográficos como o balanço geostrófico das correntes oceânicas e estes fatores se diferenciam ao longo da costa (TORGE, 2001). A TNMM em regiões costeiras e de baixa profundidade é muito afetada pelos ventos e efeitos dinâmicos da topografia do fundo do mar.

Diante da existência desta diferença entre NMM seria necessário o cálculo da TNMM para cada estação maregráfica existente ao longo da costa, o que não era possível em épocas passadas, o qual motivo faz o Brasil possuir um único *Datum* Vertical em Imbituba-SC. A Austrália, por exemplo, utilizou informações de estações maregráficas ao longo da costa o que provocou uma distorção aproximada na rede altimétrica de 1,5 m entre o extremo norte e sul (FEATHERSTONE, 2002).

No caso da rede altimétrica brasileira, além do problema da TNMM ainda existe o problema da não inclusão de observações maregráficas nos ajustamentos da rede. Estes fatores mostram uma diferença aproximada entre a superfície equipotencial do NMM de Imbituba em relação ao de Salvador acima de 20 cm e de Fortaleza maior que 50 cm (LUZ et al., 2007).

Para Dalazoana et al. (2005) estimativas da evolução temporal e espacial do NMM podem auxiliar no processo de integração de diferentes redes verticais. As variações do NMM resultam de fenômenos com características multidisciplinares, envolvendo muitas áreas como Oceanografia, Geodésia, Geofísica, etc.

É importante salientar que historicamente as variações do NMM têm sido estimadas a partir de dados de marégrafos, porém nas últimas décadas vários estudos vêm sendo desenvolvidos com base em dados da ALTSAT, proporcionando conhecimento em escala regional e global (DALAZOANA et al., 2005).

Houve uma grande mudança com o lançamento dos satélites para o monitoramento da superfície dos mares, chamados satélites altimétricos, sendo o primeiro o TOPEX/Poseidon em 1992.

Neste estudo serão utilizados dados do satélite altimétrico Jason-1, e o local escolhido foi o marégrafo de Salvador - BA e para efeito de comparação

escolheu-se o *Datum* da rede altimétrica brasileira, ou seja, a estação maregráfica de Imituba - SC.

O objetivo geral do trabalho foi demonstrar a metodologia de cálculo da TNMM através de altimetria por satélites e a determinação da TNMM da estação maregráfica de Salvador e do *Datum* da rede altimétrica brasileira para efeito de comparação.

JUSTIFICATIVA

O estudo de determinação da TNMM através de observações altimétricas por satélites proporciona vincular estas informações à Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG), e depois à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), o que contribui para a modernização da rede altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) e assim poder integrar a referida rede com a de outros países. Busca-se assim à definição de um sistema de altitudes consistente e único (global) e com características físicas da mesma forma que tem-se a rede planimétrica que foi modernizada para um Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS2000). Há uma importância também na vinculação do NMM local a este global para as atividades principalmente de navegação portuária.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

TOPOGRAFIA DO NÍVEL MÉDIO DO MAR - TNMM

A superfície dos oceanos estabelece um claro limite ao domínio espacial das atividades humanas. Além disso, ao ocupar mais de 70% da superfície terrestre, oferece a mais abrangente aproximação de uma superfície equipotencial (VANÍČEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 105; LUZ, 2008).

O aumento do conhecimento acerca da dinâmica dos oceanos confirmou a possibilidade de uma deformação permanente da superfície do mar em relação ao geoide, levando à revisão do pressuposto inicial, i.e., ser desprezível a diferença entre geoide e NMM. Com isso, em vez de se considerar os diversos NMMs locais definindo uma única superfície equipotencial, considera-se que, mesmo nas mais longas séries temporais, o NMM ainda apresenta desvios “semi-permanentes” em relação ao geoide (VANÍČEK; KRAKIWSKY, 1986; LUZ 2008). Tais desvios constituem a Topografia do NMM (TNMM) – tradução mais adequada para os termos *Sea Surface Topography* (SSTop) e *Dynamic Ocean Topography* (DOT) (LUZ, 2008).

Fatores que influenciam ou causam a TNMM

Entendida como a separação entre o NMM e o geoide, a TNMM resulta da ação “quase permanente” de diversos fatores meteorológicos e oceanográficos, com impacto diferenciado em cada ponto da costa (TORGE, 2001, p. 78).

As causas incluem, por exemplo, o balanço geostrófico das correntes oceânicas e a diferença de expansão volumétrica com origem térmica (“efeito estérico”) entre as águas tropicais e polares (VANÍCEK; KRAKIWSKY, 1986, p. 105). Em regiões costeiras e de pequena profundidade, também assumem grande importância, como causas da TNMM, as médias de longo prazo do vento e dos efeitos dinâmicos da topografia do fundo do mar (LUZ et al., 2008).

Em função da ação diferenciada daqueles agentes físicos, a TNMM apresenta grande variabilidade espacial e temporal. Conseqüentemente seria necessária a determinação de um valor específico de TNMM para cada estação maregráfica existente, o que não era possível no contexto da Geodésia Clássica (LUZ et al., 2008).

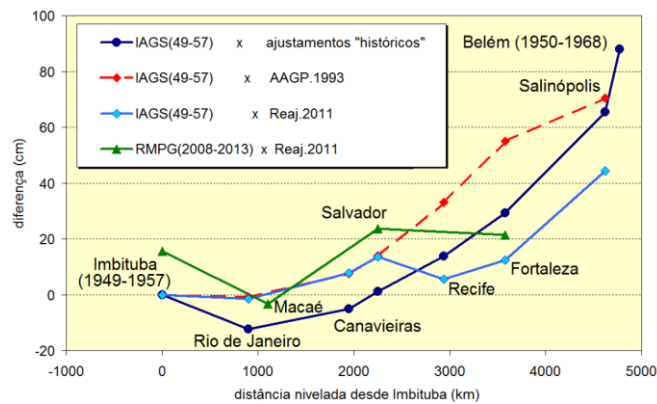
MONITORAMENTO DO NÍVEL MÉDIO DO MAR

Mesmo antes do surgimento do conceito de geóide, o NMM assim obtido já era adotado como superfície de referência para as altitudes. Close et al. (1921, p. 8) mencionam que o “Primeiro Nivelamento Geodésico” da Inglaterra, realizado entre as décadas de 1840 e 1860, teve como *Datum* a média das preamares e baixamares observadas durante dez dias de 1844 em Liverpool (LUZ et al., 2008).

Assim segundo Dalazoana et al. (2005) na Geodésia, o monitoramento do nível do mar tem um papel importante na realização de sistemas globais de referência e permite a integração de dados referidos às redes verticais clássicas, onde cada *Datum* é definido pelo NMM, com diferentes períodos de observação, vinculados a uma época específica.

A vinculação de cada *Datum* Vertical (DV) à época da realização (sendo o nível do mar variável no tempo e espaço), e os erros inerentes às operações de nivelamento, produzem diferenças significativas nas altitudes referidas às diferentes redes verticais (Figura 1), que evidenciam a necessidade do monitoramento do nível do mar (DALAZOANA et al., 2005).

Figura 1 – Diferenças entre altitudes referidas ao Datum de Imbituba e aos NMM locais em alguns marégrafos ao longo da costa brasileira, os quatro conjuntos de diferenças referem-se aos diversos ajustamentos já realizados na rede vertical



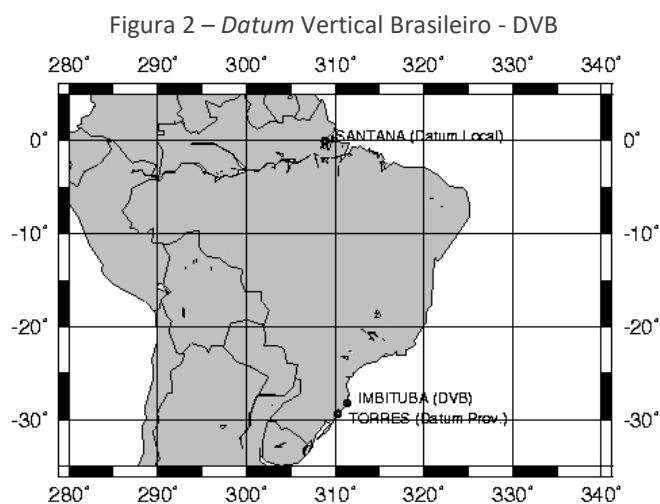
Fonte: IBGE (2013).

Na Geodésia, é evidente a necessidade de definir referências únicas para as redes verticais e horizontais, devido principalmente à difusão dos sistemas globais de posicionamento, como *Global Positioning System (GPS)*, *GLObalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)* e futuramente o GALILEO. Na América do Sul, a adoção do SIRGAS pela maioria dos países permitiu compatibilizar as redes horizontais clássicas, através da adoção de uma rede de caráter único e compatível com o *International Terrestrial Reference Frame (ITRF)*. Porém, as redes verticais continuam incompatíveis e, em alguns casos, as diferenças podem chegar a alguns decímetros (FREITAS et al., 2002b; HERNÁNDEZ et al., 2002).

Dessa forma segundo Dalazoana et al. (2005) a realização do DV através do NMM é representativa somente para o período em que foi determinado. Assim estimativas da evolução temporal e espacial do NMM podem auxiliar no processo de integração de diferentes redes verticais.

O DATUM VERTICAL BRASILEIRO - DVB

A implantação da Rede Vertical Brasileira através de nivelamento geométrico começou em 1945, no Rio Grande do Sul, época em que o país ainda não tinha um *Datum* Vertical oficial. A conexão da rede de nivelamento com o marégrafo em Torres (Figura 2), em 1946, possibilitou o cálculo de altitudes provisórias para as RRNN implantadas nessa época. O *Datum* de Torres teve caráter provisório, uma vez que foi definido com apenas um ano de observações do nível do mar (1919 – 1920), e foi substituído pelo *Datum* de Imbituba em 1958, que contava com uma série temporal de observações do nível do mar mais longa (ALENCAR, 1990 apud DALAZOANA, 2005). Desta forma, o DVB foi definido pelas observações do nível do mar entre os anos de 1949 e 1957, no porto de Imbituba em Santa Catarina (Figura 2) (DALAZOANA et al., 2005).



Fonte: Dalazona et al. (2005).

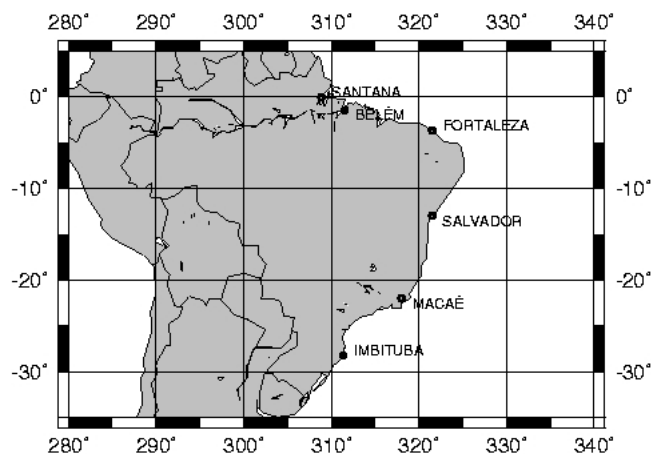
A rede de nivelamento localizada ao norte do Rio Amazonas, no Estado do Amapá, não está referenciada ao *Datum* de Imbituba devido à grande largura do rio. Nesta rede as altitudes estão vinculadas ao *Datum* local definido no Porto de Santana – AP (DALAZOANA et al., 2005).

Assim, a ligação entre o *Datum* de Santana - AP e o de Imbituba - SC pode ser considerado um importante campo de estudos relacionados com a conexão de redes verticais. Para a solução deste e outros problemas até mesmo em outras regiões, decorrentes da não unicidade dos *Data* Verticais (DVs) e das operações de nivelamento, podem contribuir: a integração de dados de ALTSAT; a associação de observações gravimétricas; a extensão RMPG, e um modelo hidrodinâmico regional no caso de Santana (DALAZOANA et al., 2005).

REDE MAREGRÁFICA PERMANENTE PARA GEODÉSIA - RMPG

A RMPG (Figura 3) foi proposta em 1997 visando à transição para o *Datum* Vertical SIRGAS e a correlação entre o *Datum* de Imbituba e outras referências altimétricas existentes ao longo da costa brasileira (DALAZOANA et al., 2005).

Figura 3 – Rede Maregráfica Permanente para Geodésia



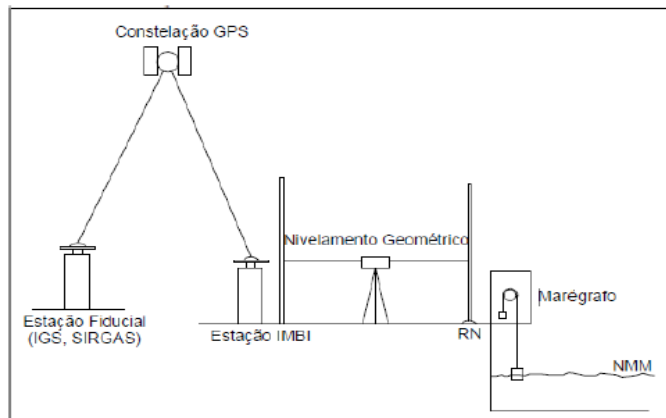
Fonte: Dalazoana et al. (2005).

De acordo com Luz (2008) a RMPG tem estações uniformemente distribuídas ao longo da costa brasileira, com o objetivo de monitorar as diferenças entre o DVB e o NMM. As informações coletadas pela RMPG serviriam para acompanhamento da evolução tanto temporal como espacial do DVB (LUZ; GUIMARÃES, 2003).

POSIÇÃO GEOCÊNTRICA DO DATUM VERTICAL

O posicionamento por GPS de uma estação localizada nas proximidades do marégrafo, e a realização do nivelamento geométrico entre esta estação e o marégrafo permitem vincular as observações maregráficas a um sistema geodésico de referência geocêntrico compatível com o *International Terrestrial Reference System* (ITRS), como ilustra a Figura 4. O monitoramento periódico da posição geocêntrica da estação possibilita estimar eventuais movimentos verticais da crosta e evitar que os mesmos sejam interpretados como variações do nível do mar (DALAZOANA et al., 2005).

Figura 4 – Esquema de monitoramento do marégrafo



Fonte: Adaptado de IOC (2002).

Uma vez monitoradas variações crustais e do nível do mar, é possível estimar as variações absolutas do NMM (DALAZOANA et al., 2005).

O conhecimento da posição geocêntrica do marégrafo possibilita, também, que o nível do mar seja relacionado ao mesmo sistema de referência utilizado pela ALTSAT, proporcionando a calibração absoluta dos altímetros e a comparação direta entre as séries temporais de dados maregráficos e dados provenientes dos sensores altímetros (DALAZOANA et al., 2005).

ALTIMETRIA POR SATÉLITES

Segundo Peixoto (2007) nos últimos 20 anos, com o avanço da era espacial, novos instrumentos de estudo oceanográfico foram desenvolvidos, com o propósito de melhorar ou complementar as antigas medições pontuais realizadas por instrumentos na costa a partir do século XVIII. Em se tratando de estudo do nível do mar, antes dos satélites altimétricos, eram usados principalmente marégrafos de costa e expedições com medidores do nível do mar por pressão em regiões pelágicas, além também do uso de modelos numéricos de simulação. Em 1990 a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) - EUA, em conjunto com a *Centre National d'Études Spatiales* (CNES)- França, iniciaram o programa de estudos por satélite em oceanografia, utilizando em seus primeiros projetos os satélites *Geodetic Satellite* (GEOSAT) e *European Research Satellite* (ERS).

A altimetria por satélites é uma técnica de sensoriamento remoto com importantes aplicações na Geodésia, Oceanografia e áreas correlatas. Tem sido uma ferramenta eficaz no monitoramento da superfície do mar (BOSCH, 2005; DALAZOANA, 2005).

O Quadro 1 mostra as principais vantagens e desvantagens na utilização de dados obtidos por sensores a bordo de satélites segundo Polito e Sato (2003).

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens dos sensores a bordo de satélites

Vantagens	Desvantagens
Vantagem econômica	Dados restritos à superfície
Cobertura geográfica	Influência da atmosfera
Cobertura temporal	Problemas técnicos catastróficos
Resolução espacial	Erros de calibração
Resolução temporal	
Metodologia consistente	
Inovação tecnológica	

Fonte: Polito e Sato (2003).

MEDIDAS EFETUADAS PELOS SATÉLITES ALTÍMETROS

Praticamente todas as medidas tomadas por sensores remotos são superficiais e quando muito, revelam valores integrados na zona fótica (~10 m). A extrapolação vertical destas medidas depende muito do mecanismo considerado e é em geral bastante complicada. O caso das medidas de altura da superfície do mar é diferente. O altímetro nos permite inferir a velocidade das correntes geostróficas, a quantidade de calor armazenado na coluna d'água e variações na profundidade da termoclima. Estas medidas refletem valores verticalmente integrados e permitem inferências relativamente precisas a respeito da dinâmica interna dos oceanos (POLITO; SATO, 2003).

FUNDAMENTOS TECNOLÓGICOS DOS SATÉLITES ALTÍMETROS

O altímetro é um instrumento ativo que emite pulsos na banda de radar. O pulso de radar atinge uma área cujo raio é de aproximadamente 30 km. Este pulso sofre reflexão aproximadamente especular na superfície do oceano e parte de sua energia volta à antena do satélite após um tempo Δt . Como sabemos a velocidade c da luz podemos determinar a distância $d = c \cdot \Delta t$ entre o altímetro e a superfície do mar. O dado mais impressionante da operação deste instrumento é a sua precisão, que chega a 2 cm. Para que se alcance tal precisão são necessárias várias correções decorrentes da influência de fatores eletromagnéticos que retardam o pulso de radar e de fatores que influem na movimentação da superfície em relação ao satélite. Além de seu objetivo básico, o altímetro também mede a altura significativa das ondas e a magnitude do vento. Como a superfície do mar não é plana, a reflexão não é exatamente especular. O sinal se deforma e esta deformação é proporcional à altura significativa (i.e. média da amplitude) das ondas (POLITO; SATO, 2003).

PRINCÍPIO DA MEDIDA DA ALTIMETRIA POR SATÉLITES

O princípio básico está na medição do tempo pelo satélite altímetro entre a emissão e a recepção do sinal após ser refletido pela superfície do mar. A altitude (R_s) do satélite sobre a superfície instantânea do mar (Equação 1) pode ser estimada a partir do tempo de percurso do sinal emitido pelo radar (Δt) (CHELTON et al., 2001; SEEBER, 2003):

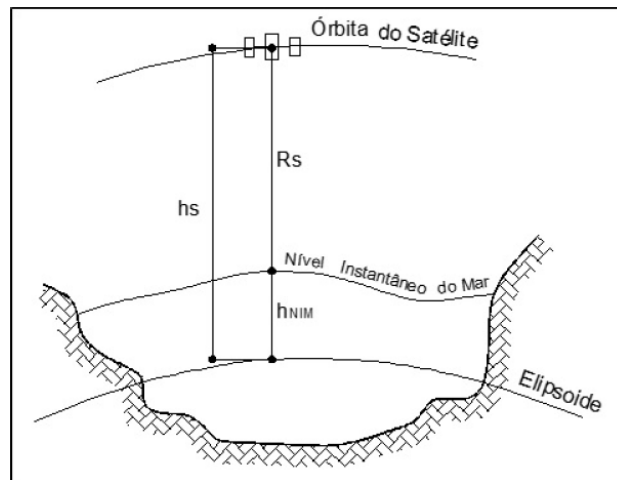
$$R_s = c \cdot \left(\frac{\Delta t}{2}\right), \quad (1)$$

onde c é a velocidade de propagação da luz no vácuo.

Uma vez que a órbita do satélite é conhecida, a altitude do satélite sobre um elipsoide de referência (h_s) também é conhecida (Figura 5), pode-se então determinar a altitude da superfície instantânea do mar em relação ao elipsoide de referência (h_{NIM}), pela Equação 2:

$$h_{NIM} = h_s - R_s. \quad (2)$$

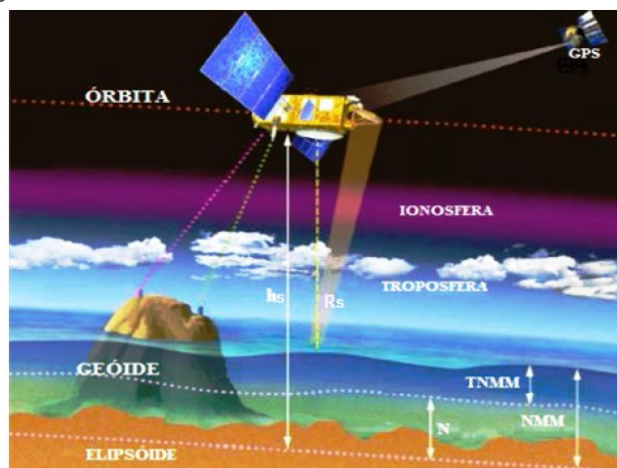
Figura 5 – Princípio simplificado da altimetria por satélites



Fonte: Adaptado de Seeber (2003).

Porém, ao passar pela atmosfera (Figura 6), o sinal eletromagnético sofre refração devido principalmente ao vapor de água e ionização, fenômenos que precisam ser corrigidos (LUZ, 2008).

Figura 6 – Influências atmosféricas sobre os satélites altímetros



Fonte: Adaptado CNES (2016).

Dessa forma, tanto h_s quanto R_s contêm erros; logo a conversão das medidas do altímetro em altitudes da superfície do mar (*Sea Surface Heights - SSH*) requer uma série de correções, como por exemplo: influências instrumentais e

atmosféricas, correções das órbitas dos satélites altímetros, entre outras (SEEBER, 2003).

A distância (R) entre o satélite e o NMM (Figura 7) é expressa pela Equação 3 (CHELTON et al., 2001):

$$R = R_s - \sum_j \Delta R_j, \quad (3)$$

onde o somatório envolve as diversas correções necessárias.

Conforme Cheney et al. (1987) as correções devem ser aplicadas aos dados de satélite a fim de eliminar diversos efeitos que afetam os valores medidos pelo altímetro. De acordo com os parâmetros de correções citados anteriormente, para Lopes et al. (2008) na utilização do *range* (distância do centro de massa do satélite até a superfície do mar) deve-se fazer uma série de correções, pois o mesmo sofre influências das condições ambientais, cuja negligência pode inviabilizar a utilização dos dados dos altímetros.

De acordo com Chelton et al. (2001) o *range* corrigido (R_{corr}) é igual a Equação 4:

$$R_{corr} = R_s - \sum r_{instrum} + \sum r_{atmosf} + \sum r_{superf} + \sum r_{geof}. \quad (4)$$

As correções instrumentais ($r_{instrum}$), referem-se, dentre outras causas, às alterações de frequência do sinal refletido, à deriva do temporizador, às variações de atitude do satélite e aos ajustes introduzidos pelos próprios sistemas de coleta e tratamento do sinal refletido, embarcados no satélite, a fim de maximizar a resolução vertical das observações (CHELTON et al., 2001, p. 33).

Os efeitos atmosféricos (r_{atmosf}) são constituídos pelas componentes ionosférica e troposférica. Esta última, por sua vez, é tratada separadamente segundo os efeitos dos gases secos e do vapor d'água (LUZ, 2008).

Segundo Luz (2008) as correções (r_{superf}) referentes à superfície refletora dizem respeito à irregularidade da superfície oceânica em função das ondas, que introduz um desvio, em relação ao NMM instantâneo, conhecido comumente por *Sea State Bias* (SSB).

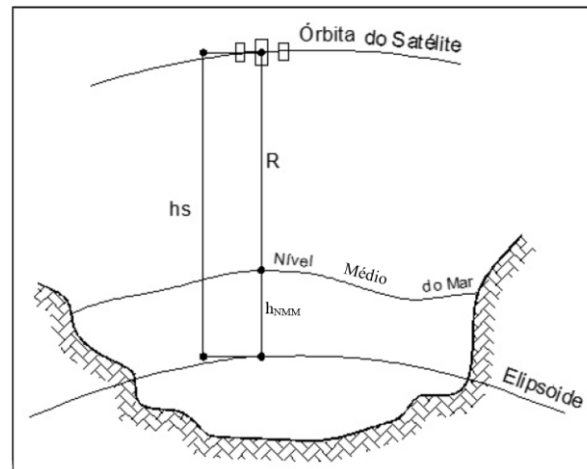
Dentre as correções geofísicas (r_{geof}), incluem-se as marés terrestres e oceânicas, as alturas geoidais, o nível dinâmico do mar, e o efeito do barômetro inverso (variação da pressão atmosférica) (LUZ, 2008).

De posse da distância corrigida (R_{corr}), obtém-se a altitude da superfície média do mar (Figura 7) (TAPLEY; KIM, 2001) em relação ao elipsoide de referência como Equação 5:

$$h_{NMM} = h_{sat} - R_{corr} - r_{cruz}, \quad (5)$$

a partir da altitude h_{sat} do satélite em relação ao mesmo elipsoide e da componente radial residual r_{cruz} . Enquanto h_{sat} é derivada das informações oriundas dos diversos sistemas de rastreamento dos satélites altimétricos, r_{cruz} resulta da análise dos cruzamentos (*crossovers*) das trilhas dos diferentes satélites, a fim de compatibilizar as informações dessas múltiplas missões altimétricas (BOSCH; SAVCENKO 2006).

Figura 7 – Estimativa da h_{NMM}

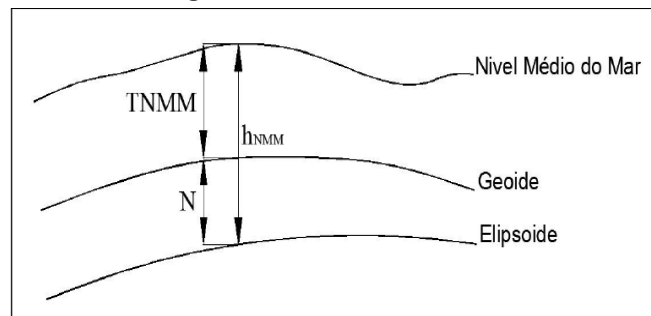


Fonte: Dalazoana (2005).

Por fim, a TNMM (Figura 8) é obtida com a simples diferença entre a altitude h_{NMM} e a altura geoidal N expressa pela Equação 6:

$$TNMM = h_{NMM} - N. \quad (6)$$

Figura 8 – Estimativa da TNMM



Fonte: Adaptado de Dalazoana (2005).

A altura geoidal pode ser extraída de algum dos modelos globais do geopotencial disponíveis. No entanto, a diferença de resolução espacial entre os dados de ALTSAT e mesmo os mais recentes modelos do geopotencial introduz inconsistências nesse tipo de solução (LUZ et al., 2008).

MISSÕES TOPEX/POSEIDON E JASON-1

A técnica da altimetria satelital foi testada pela primeira vez durante as missões *Sky Laboratory* (SKYLAB), entre os anos de 1973 e 1974, sendo que a precisão conseguida com o altímetro foi de 1 a 2 m (SEEBER, 2003, p. 444). Posteriormente, novas e melhoradas versões de altímetros voaram com os satélites GEOS-3 (1975), SEASAT-1 (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), TOPEX/Poseidon (T/P) (1992), Jason-1 (2001), entre outros, sendo que em muitos destes satélites a precisão do altímetro é melhor do que 3 cm (DALAZOANA, 2005).

Segundo Luz et al. (2008) o satélite T/P, foi lançado em agosto de 1992, com tempo de operação previsto de cinco anos, que se alongaram para 13 anos, até

2005. Seu sucessor, Jason-1, entrou em operação em dezembro de 2001, na mesma configuração orbital que o T/P, com finalidade inicial de calibração (CHAMBERS et al. 2003). Um ano depois, o T/P foi movido para nova órbita, definida de modo a duplicar a cobertura espacial conjunta com Jason-1. Nesta nova configuração, a missão T/P é denominada T/P-EM (*Extended Mission*). Outras missões altimétricas importantes foram conduzidas com base nas séries de satélites ambientais das agências espaciais europeia (ERS-1, ERS-2 e ENVISAT) e americana (GEOSAT e seu sucessor GFO) (LUZ et al., 2008).

Assim o satélite TOPEX/Poseidon representa a mais duradoura missão da altimetria por satélites, cujo contínuo processo forneceu dados de alta precisão (SEEBER, 2003). Com uma precisão aproximada de 2 cm, este satélite ganhou um companheiro em 2001, o Jason-1, cujo altímetro tem características similares, os dois satélites voaram em órbitas paralelas intercaladas, de modo a maximizar a resolução espacial (POLITO; SATO, 2003).

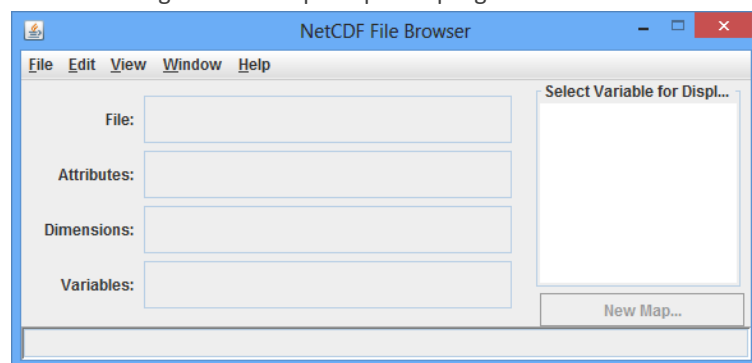
DETERMINAÇÃO DA TNMM

Os dados utilizados foram de observações do satélite altimétrico Jason-1. Neste estudo utilizou-se o modelo *Global Mean Dynamic Topography - MDT_CNES_CLS13* produzido pela CNES, sendo que os dados foram disponibilizados pela *Archivage, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques* (AVISO).

Para a obtenção dos dados foi feita uma solicitação a AVISO através do link <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mdt.html>, preencheu-se um formulário para obter uma conta de acesso, depois de alguns dias a AVISO enviou um login e uma senha por e-mail. Com esta autorização foi possível baixar os dados através do FTP.

Com o software NetCDF Browser Application (Figura 9) desenvolvido por NOAA/PMEL/EPIC, foi possível gerar os gráficos de TNMM.

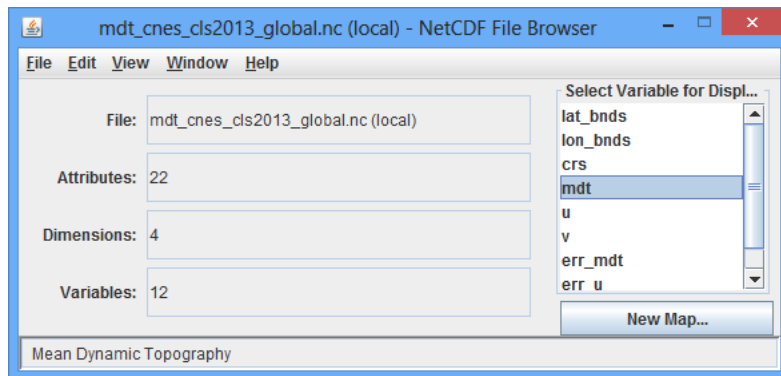
Figura 9 – Tela principal do programa NetCDF



Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

Através da opção File do programa NetCDF buscou-se o arquivo com os dados de TNMM em forma de grid baixado na página da AVISO. Neste momento apareceu as variáveis possíveis de serem mapeadas pelo programa, como pode-se observar na Figura 10. Sendo que a variável utilizada para mapeamento foi a que representa a Topografia do Nível Médio do Mar, a mdt.

Figura 10 – Programa com as variáveis possíveis de serem mapeadas

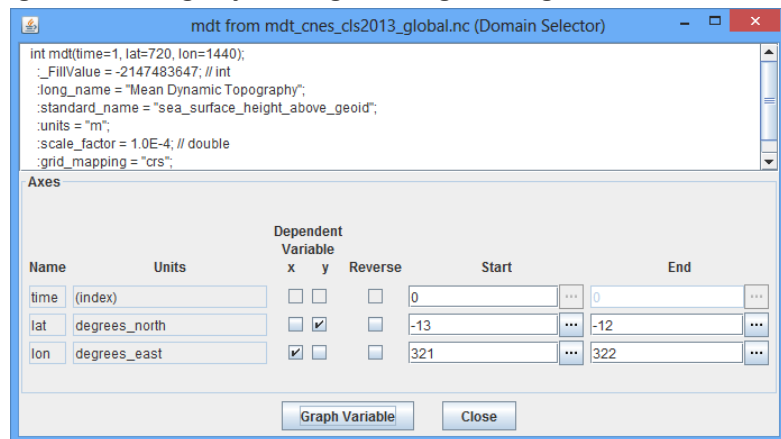


Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

Assim que definiu-se a variável mdt, o programa pede a região a ser mapeada através das coordenadas geográficas de um polígono envolvente onde fica o local de estudo. A Figura 11 mostra as coordenadas de um polígono onde fica o marégrafo de Salvador.

Para a geração do gráfico com a espacialização da TNMM, o programa exige que as coordenadas geográficas estejam no formato decimal e que a longitude tenha origem em Greenwich e seja crescente para leste até 360°, ou seja, não há longitude negativa. No caso das latitudes a origem é no Equador e crescente positiva para o Norte e crescente negativa para o Sul.

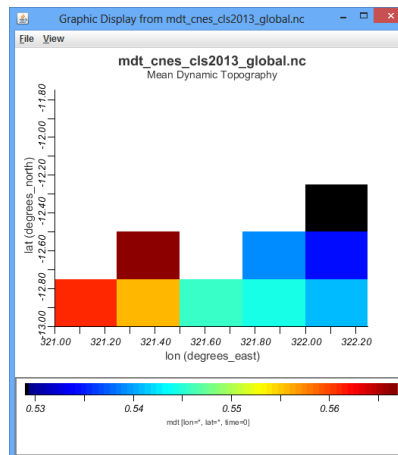
Figura 11 – Configuração da região a ser gerado o gráfico da variável MDT



Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

O mapeamento é feito através de uma interpolação de valores de TNMM, onde é mostrado em um gráfico um gradiente de cores representativos estes valores conforme (Figura 12).

Figura 12 – Gráfico da TNMM de uma região

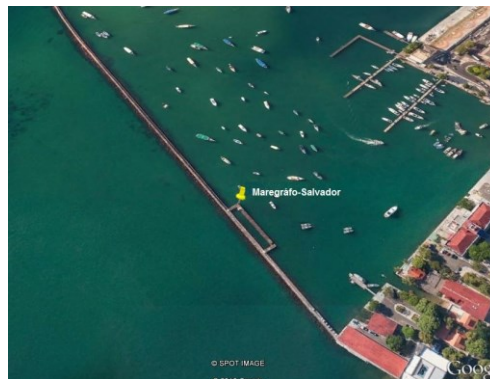


Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

DETERMINAÇÃO DA TNMM DO MAREGRÁFO DE SALVADOR - BA

O marégrafo de Salvador (Figura 13) localiza-se na região portuária nas coordenadas $\phi = 12^\circ 58' 26''$ S e $\lambda = 38^\circ 31' 02''$ W.

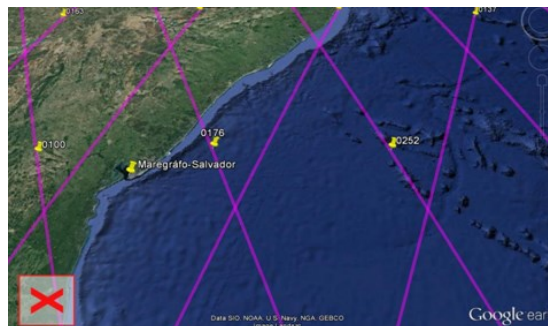
Figura 13 – Localização do marégrafo de Salvador – BA



Fonte: Google Earth (2016).

A Figura 14 mostra as trilhas dos satélites altímetros que passam na região de Salvador, sendo as mais próximas as trilhas 0061, 0239, 0100 e 0176, nas quais são determinados a TNMM e para o marégrafo foi feita uma interpolação.

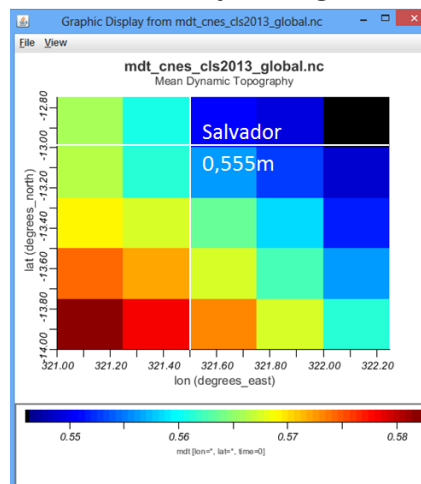
Figura 14 – Trilhas do satélite Jason-1



Fonte: AVISO - <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/tools/pass-locator.html/> Google Earth (2016).

Com o programa NetCDF foi definido o retângulo envolvente da região onde se localiza o marégrafo de Salvador, sendo: canto superior direito ($\lambda= 322,20^\circ$; $\phi= -12,80^\circ$) e canto inferior esquerdo ($\lambda= 321,00^\circ$; $\phi= -14,00^\circ$). Diante destas informações o programa fez-se a espacialização das TNMM da região selecionada, e através das coordenadas geográficas do marégrafo de Salvador ($\lambda= 321,48^\circ$ e $\phi= -12,97^\circ$), na Figura 15 foi obtido a TNMM no valor de 55,5 cm.

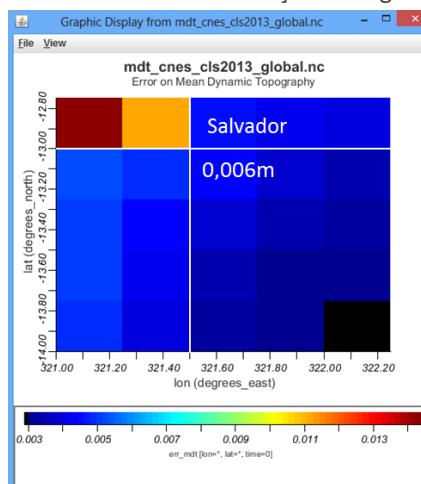
Figura 15 – TNMM da estação maregráfica de Salvador



Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

O modelo também informa a incerteza da determinação da TNMM, neste caso usou-se a variável `err_mdt` e foi especializada e encontrou-se o valor para a precisão da TNMM de Salvador na Figura 16 o valor de $\pm 0,6$ cm.

Figura 16 - Incerteza da TNMM da estação maregráfica de Salvador



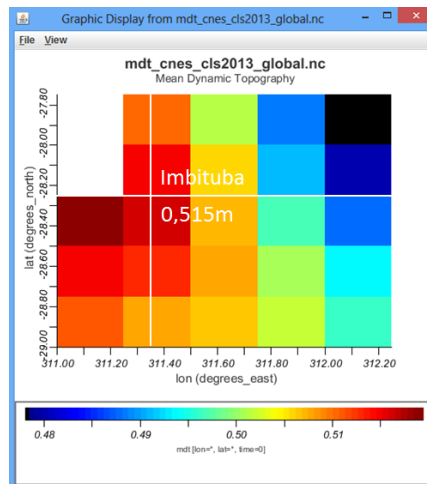
Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

DETERMINAÇÃO DA TNMM DO MARÉGRAFO DE IMBITUBA - SC

Foi determinado também a TNMM do marégrafo de Imbituba para efeito de comparação entre os referidos NMMs das estações maregráficas, tendo em vista que o referido marégrafo de Imbituba é o *Datum* da rede altimétrica brasileira.

O retângulo envolvente da região onde se localiza o marégrafo de Imbituba foi definido no programa NetCDF, sendo: canto superior direito ($\lambda = 312,20^\circ$; $\phi = -27,80^\circ$) e canto inferior esquerdo ($\lambda = 311,00^\circ$; $\phi = -29,00^\circ$). Diante destas informações o programa fez-se a espacialização das TNMM da região selecionada, e através das coordenadas geográficas do marégrafo de Imbituba ($\lambda = 311,35^\circ$ e $\phi = -28,23^\circ$), na Figura 17 foi obtido a TNMM no valor de 51,5 cm.

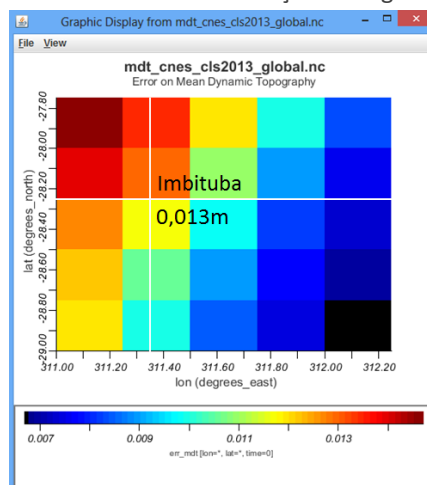
Figura 17 – TNMM da estação maregráfica de Imbituba



Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

A incerteza da determinação da TNMM foi obtida através do modelo usando a variável `err_mdt` e foi espacializada pelo programa NetCDF e encontrou-se o valor para a precisão da TNMM de Imbituba pelo gráfico, Figura 18 o valor de $\pm 1,3$ cm.

Figura 18 – Incerteza da TNMM da estação maregráfica de Imbituba



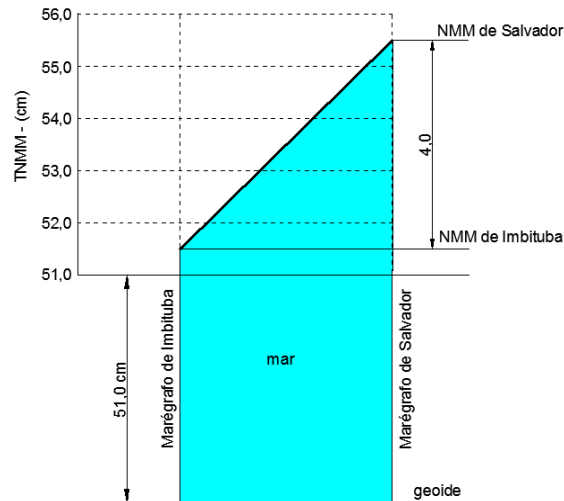
Fonte: NetCDF Browser Application (2016).

COTEJAMENTO ENTRE O NMM DE SALVADOR E IMBITUBA

O valor da TNMM obtido para o marégrafo de Salvador foi de 55,5 cm $\pm 0,6$ cm. Para o marégrafo de Imbituba o modelo forneceu um valor de 51,5 cm $\pm 1,3$ cm. Com base nestes resultados pode-se observar que o NMM em Salvador está

mais elevado $4,0 \text{ cm} \pm 1,4 \text{ cm}$ do que o NMM do *Datum* da rede altimétrica brasileira, como pode-se observar na Figura 19.

Figura 19 - Diferença de NMM entre o *Datum* e o marégrafo de Salvador



Fonte: Autores (2016).

CONCLUSÃO

O tema abordado neste trabalho representa uma das principais questões analisadas dentro da Geodésia Moderna. A TNMM é um efeito que contribui para o afastamento entre o NMM e o geóide, e tal conceito é essencial para uma definição rigorosa do geóide e de um sistema de altitudes consistente e único.

Uma definição rigorosa do geóide ajudaria a tornar possível a realização da referência vertical global de forma consistente, uma vez que a busca por uma rede de referência vertical consistente torna-se cada vez mais necessária, à medida que a integração de dados locais com modelos globais está se tornando uma prática cada vez mais aplicada na Geodésia Moderna.

Com o avanço da era espacial e com o desenvolvimento de estudos com dados da ALTSAT, a qualidade dos modelos de TNMM tem experimentado grandes avanços e tem produzido resultados cada vez mais precisos e possibilitando um amplo conhecimento sobre a TNMM.

Cabe ressaltar que ALTSAT é uma ferramenta eficaz no monitoramento do NMM, assim ela pode complementar as informações geradas pelos marégrafos, contribuindo para melhorar a distribuição espacial e a representatividade na determinação do NMM.

No trabalho foram utilizadas as observações do satélite altimétrico Jason-1 e a TNMM foi obtida através do modelo *Global Mean Dynamic Topography - MDT_CNES_CLS13* produzido pela CNES. E através da interpolação da TNMM pelo software NetCDF Browser Application obteve-se no marégrafo de Salvador uma TNMM no valor de $55,5 \text{ cm} \pm 0,6 \text{ cm}$.

Diante do cálculo da TNMM do marégrafo de Salvador, aproveitou-se tal metodologia e fez-se o cálculo da TNMM do *Datum* Vertical Brasileiro, onde obteve-se um valor de $51,5 \text{ cm} \pm 1,3 \text{ cm}$. Desta forma pode-se fazer uma

comparação entre as TNMM, onde verificou-se pelos resultados que o NMM em Salvador está mais elevado $4,0 \text{ cm} \pm 1,4 \text{ cm}$ do que o NMM do ponto *Datum* da rede altimétrica brasileira.

A questão sobre a definição e realização de sistemas altimétricos baseados na determinação da TNMM ainda demandará esforços para que possam ser aplicados na prática no contexto brasileiro. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos no trabalho, pretende-se dar continuidade ao estudo realizado, auxiliando na discussão de alternativas para um futuro sistema altimétrico moderno no país.

Determination of the mean dynamic topography with altimetry satellite

ABSTRACT

The Mean Dynamic Topography (MDT) is nothing more than the spacing between the Mean Sea Level (MSL) and the geoid. The MDT is the result of meteorological and oceanographic factors, which affect the MSL sites along the coast do not be on the same equipotential surface. In recent decades several studies have been developed basing on data from Altimetry data by Satellite (ALTSAT). The objective work focuses presenting the methodology of MDT calculation through the ALTSAT and to determine the Salvador - BA MDT tide station and the Imbituba - SC for comparison effect. Was used to calculate the Global Mean Dynamic Topography model - MDT_CNES_CLS13, where he obtained to Salvador one MDT of 55.5 ± 0.6 cm and Imbituba one MDT 51.5 ± 1.3 cm. Therefore, it is verified that the difference between the MSL Brazilian Vertical Datum and tide gauge station Salvador is 4.0 ± 1.4 cm determined based on observations altimeter satellite Jason-1 modeled by MDT_CNES_CLS13.

KEYWORDS: MDT. Altimetry Network. Altimetry by Satellite.

REFERÊNCIAS

BOSCH, W. **Satellite Altimetry**. Curso ministrado na Universidade Federal do Paraná. Maio, 2005.

BOSCH W., SAVCENKO R. Satellite Altimetry: Multi-Mission Cross Calibration. In: Tregoning P., Rizos C. (eds) **Dynamic Planet. International Association of Geodesy Symposia**. v. 130. Berlin: Springer. 2007. p. 51-56. https://doi.org/10.1007/978-3-540-49350-1_8.

CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES (CNES). AVISO: Archiving, Validation et Interprétation des données des Satellites Océanographiques, 2016. Disponível em: <<http://www.aviso.oceanobs.com>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

CHAMBERS, D. P.; HAYES, S. A.; RIES, J. C.; URBAN, T. J. New TOPEX sea state bias models and their effect on global mean sea level. *J. Geophys. Res.*, v. 108, n. C10, 3305. 2003. <http://dx.doi.org/10.1029/2003JC001839>.

CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; FU, L. L.; CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, L. L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry and Earth Sciences: a Handbook of Techniques and Applications**. Academic Press, 2001. p. 1-131.

CHENEY, R. E, DOUGLAS, B. C., AGREEN, R. W., MILLER L., PORTER D. L. & DOYLE, N. S. **Geosat Altimeter geophysical data record user handbook**. Tech. Memo. NOS NGS - 46. Natl. Oceanic and Atmos. Admin., Boulder, Colo, 30p., 1987.

CLOSE, C. F.; JOLLY, H. L. P.; WOLFF, A. J. **The Second Geodetic Levelling of England and Wales, 1912-1921**. Ordnance Survey, 1921.

DALAZOANA, R.; LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C. Estudos do NMM a partir de séries temporais maregráficas e de Altimetria por satélites visando a integração da rede vertical brasileira ao SIRGAS. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 57, n. 2, p.140-153, ago. 2005.

DALAZOANA, R. **Estudos Dirigidos à análise temporal do Datum Vertical brasileiro**. 2005. 188f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FEATHERSTONE, W. E Prospects for the Australian Height Datum and Geoid Model. In: Ádám J., Schwarz KP. (eds) **Vistas for Geodesy in the New Millennium. International Association of Geodesy Symposia**. v. 125, Budapest: Springer, Berlin, Heidelberg. p. 96-101, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04709-5>.

FREITAS, S.R.C. de; MEDINA, A.S.; LIMA, S.R.S de. Associated Problems to Link South American Vertical Networks and Possible Approaches to Face Them. In: Drewes, H., Dodson, A.H., Fortes, L.P.S., Sánchez, L., Sandoval, P. (eds), **IAG Symposium 124: Vertical Reference Systems**. v. 124, Berlin: Springer-Verlag, p. 318-323, 2002b. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8>.

HERNÁNDEZ, J.N.; BLITZKOW, D.; LUZ, R.T.; SÁNCHEZ, L.; SANDOVAL, P.; DREWES, H. Connection of the Vertical Control Networks of Venezuela, Brazil and Colômbia. In: Drewes, H., Dodson, A.H., Fortes, L.P.S., Sánchez, L., Sandoval, P. (eds), **IAG Symposium 124: Vertical Reference Systems**. v. 124, Berlin: Springer-Verlag, p. 324-327, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8>.

IBGE, Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – 2001-2012**. Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/2/790/CT02-64_05082014.pdf>. Acesso em: 13 out. 2016.

IOC. Intergovernmental Oceanographic Commission. **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Volume III – Reappraisals and Recommendations as of the year 2000. IOC – Intergovernmental Oceanographic Commission, Manual and Guides No. 14, UNESCO, 2002. 49 p.

LOPES, A. B.; HARARI, J.; MESQUITA, A. R. A utilização de satélites altimétricos e gravimétricos no estudo das variações do nível do mar no Atlântico Sul. In: Afro-America Gloss News, 01 dez/2008. IO – USP, São Paulo.

LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Dez Anos de Monitoramento do Nível do Mar no IBGE. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná, 6 a 9 de maio, 2003. **Anais em CD-ROM**. 2003.

LUZ, R. T.; FREITAS, S. R. C.; PINHEIRO, R. R.; GOLDANI, D.; SANTOS, C. C. C.; DI MAIO PEREIRA, N. R.; SUBIZA PIÑA, W. H. Avaliação das realizações da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CBCG), 5., 2007, Presidente Prudente. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2007a. CD-ROM.

LUZ, R. T.; **Estratégias para modernização da componente vertical do sistema geodésico brasileiro e sua integração ao SIRGAS**. 2008. 207f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

LUZ, R. T.; BOSCH, W.; DE FREITAS, S.R.C.; HECK, B. Topografia do Nível Médio do Mar no litoral sul- sudeste brasileiro. In: **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, Recife - PE, 2008.

PEIXOTO, P.S. **Jason-1: Lendo os dados de altimetria por satélite para o nível do mar**, IO – USP, São Paulo, maio/2007.

POLITO, P. S.; SATO, O. T. **Oceanografia por Satélites**. Instituto Oceanográfico – USP/ INPE –São José dos Campos, São Paulo, 2003.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter. 2003. 612 p.

TAPLEY, B. D.; KIM, M.-C. Applications to Geodesy. In: FU, L.-L.; CAZENAVE, A. (Ed.). **Satellite Altimetry and Earth Sciences**. San Diego: Academic Press. 2001. p. 371-406. 463 p.

TORGE, W. **Geodesy**. 3. compl. rev. and ext. ed. Berlin: Walter de Gruyter. 2001. 416 p.

VANICEK, P. & KRAKIWSKY, E. J. **Geodesy: the Concepts**. 2. ed., 6. print. Amsterdam: Elsevier. 1986. 697 p.

Recebido: 14 nov. 2016

Aprovado: 14 mar. 2018

DOI: 10.3895/rbgeo.v6n2.5517

Como citar: REIS, V. P.; BARBOSA, L. G.; PALMEIRO, A. S. 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>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Vania Pereira Reis

Rua Maria Assunção, 105, CEP 35547-000, Carmo da Mata, Minas Gerais, Brasil.

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

