

Análise relativa do nível médio do mar em Cananeia/SP

RESUMO

Fabio Luiz Albarici

fabio.albarici@ifsuldeminas.edu.br

orcid.org/0000-0003-4436-0561

Instituto Federal do Sul de Minas (IFSULDEMINAS), Inconfidentes, Minas Gerais, Brasil.

Gabriel do Nascimento

Guimarães

gabriel@ufu.br

orcid.org/0000-0003-4380-4650

Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil.

Jorge Luiz Alves Trabanco

trabanco@fec.unicamp.br

orcid.org/0000-0002-2558-2858

Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo, Brasil.

Atualmente, os marégrafos utilizados nas estações maregráficas possuem boa acurácia em suas observações. Um marégrafo, com boa acurácia, da marca OTT-Hydrometrie modelo Kalesto está instalado na estação maregráfica de Cananeia/SP. O objetivo deste trabalho é realizar a análise relativa do Nível Médio do Mar (NMM) neste marégrafo. Calculou-se o NMM a partir das observações maregráficas sem correções geodinâmicas de dois períodos: 1955-2007 e 2012-2015 e analisou-se estes resultados com os modelos de NMM regional (NOAA e CU) e global (AVISO e CSIRO), estes quatro modelos já possuem as correções geodinâmicas. Os resultados do NMM calculado, mostra que o nível médio vem aumentando de forma gradual e estável, com valores para o primeiro e segundo período de 3,8mm/ano e 7mm/ano, respectivamente. Ao analisar as taxas de variação provenientes dos modelos regionais, verifica-se que estes possuem valores para o primeiro e segundo período de 3,16mm/ano e 5,14mm/ano (NOAA) e 2,44mm/ano e 3,28mm/ano (CU), respectivamente. Já o modelo global não possui valores separados por períodos, apenas o valor para a série histórica (1993-2015), sendo de 3,26mm/ano (AVISO) e 3,4mm/ano (CSIRO). Dessa forma, vê-se que as observações sem correções possuem boa acurácia, porém para aplicações que exigem maior acurácia há a necessidade de aplicar-se as correções geodinâmicas.

PALAVRAS-CHAVE: Maré Oceânica. Marégrafo. Nível Médio do Mar.

INTRODUÇÃO

Os constantes avanços da tecnologia espacial, como o posicionamento e a determinação do nível médio do mar através da altimetria por satélite (pelas missões TOPEX/POSEIDON, JASON 1 e 2 dentre outras (JPL, 2017)), têm contribuído de forma determinante para modelagem do aumento do nível médio do mar globalmente e regionalmente. O nível do mar é uma quantidade interessante na pesquisa das ciências da Terra porque integra as variações de algumas variáveis climáticas e não climáticas distintas. Por exemplo, em termos de nível médio global, o aumento do nível do mar é resultante principalmente da expansão térmica da água do mar devido às mudanças na temperatura do oceano e à adição de massas de água nas bacias oceânicas devido ao degelo das geleiras (LEULIETTE; WILLIS, 2011; CHEN *et al.*, 2013; CHURCH *et al.*, 2013).

Embora as variações regionais no nível do mar absoluto resultem principalmente das variações da temperatura e salinidade do oceano, fatores não climáticos também desempenham um papel importante. Com este efeito, a resposta visco/elástica da Terra sólida ao derretimento das geleiras e do solo congelado, provoca deformações complexas das bacias oceânicas e, portanto, do nível do mar (STAMMER *et al.*, 2013). Ao longo das linhas costeiras, as mudanças relativas do nível do mar ocorrem devido a uma combinação de mudanças absolutas do nível do mar e movimentos verticais da crosta terrestre (WOPPELMANN *et al.*, 2009).

Este aumento do nível do mar é uma resposta às crescentes concentrações de gases com efeito de estufa na atmosfera e as consequentes alterações no clima global. O aumento do nível do mar contribui para a erosão costeira e a inundação de regiões costeiras de baixa altitude, particularmente durante eventos extremos do nível do mar. Também leva à intrusão de água salgada em aquíferos, deltas e estuários. Essas mudanças afetam os ecossistemas costeiros, os recursos hídricos e os assentamentos e atividades humanas. As regiões com maior risco incluem regiões densamente povoadas, pequenas ilhas (especialmente atóis de corais) e costas arenosas apoiadas por grandes desenvolvimentos costeiros (CSIRO, 2017). A grande maioria dos países possuem agências que monitoram o nível do mar constantemente, pois esta variação está em função, principalmente, da época da observação e da posição geográfica onde se encontram os medidores instalados. Estes medidores são também chamados comumente de marégrafos.

Neste trabalho, o objeto de estudo é o NMM no marégrafo de Cananeia, localizado no sul do estado de São Paulo, onde em 2011, pela necessidade de modernização e melhora na acurácia das observações, foi instalado um novo marégrafo, da marca *OTT-Hydrometrie*, modelo Kalesto, com leitura do nível do mar por radar. As séries de observações do NMM, ao serem calculadas, necessitam de filtros para remover algumas inconsistências, como a oscilação da maré devido a influências externas presentes no ambiente onde se localizam. Além dos filtros, a estação maregráfica também sofre influências geodinâmicas (ex: maré terrestre e deslocamento da crosta). O mesmo acontece com os modelos de maré global e regional, que necessitam da aplicação de filtros e das correções geodinâmicas, dentre elas destacam-se: maré terrestre, modelos geoidais, Ajustamento Isostático Glacial (GIA), Topografia Dinâmica do Oceano (DOT), Topografia Dinâmica Média (MDT) que somados geram inconsistências na determinação do nível médio do mar. Outro problema relacionado ao nível médio do mar é

obtenção da altitude ortométrica onde sua referência (*Datum*) é definida pelo Nível Médio do Mar (NMM), com diferentes períodos de observação e vinculados a uma época específica. Esta altitude ortométrica é de fundamental importância para obras de infraestrutura portuária, viária, dentre outras.

Dessa forma, vê-se a importância do NMM para as várias áreas, assim o objetivo desta pesquisa é analisar a variação temporal do nível médio do mar em Cananeia através das observações maregráficas sem as correções geodinâmicas. Para verificar a confiabilidade e a acurácia destas observações sem as devidas correções, utilizou-se para esta análise os modelos globais e regionais de quatro agências internacionais que geram os modelos para o nível médio do mar com as devidas correções geodinâmicas. Assim, após obter os valores do NMM em Cananeia, pode-se quantificar as diferenças com os modelos utilizados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A mudança do nível do mar é de grande interesse por duas razões fundamentais. Primeiro, as mudanças na taxa de elevação do nível do mar estão intimamente relacionadas com as mudanças no clima da Terra. Em segundo lugar, a mudança do nível do mar tem importantes consequências socioeconômicas para as populações que vivem em regiões costeiras de baixa altitude (CAZENAVE; NEREM, 2004). O nível médio global dos oceanos é um dos indicadores mais importantes das alterações climáticas. Ele incorpora as reações de vários componentes do sistema climático (AVISO, 2017).

Existem essencialmente dois tipos de observações para medição o nível do mar diretamente: (1) Marégrafos (medições de maré), que em alguns casos remontam a mais de 100 anos, e (2) medições de altimetria por satélite, que estão disponíveis apenas a partir dos anos 1990 (CAZENAVE; NEREM, 2004).

O monitoramento preciso das mudanças no nível médio dos oceanos, particularmente através do uso de satélites altimétricos, é de vital importância, para entender não apenas o clima, mas também as consequências socioeconômicas de qualquer aumento no nível do mar (AVISO, 2017). Já os marégrafos fornecem excelentes medições da mudança relativa do nível do mar (em relação à crosta terrestre), mas determinar a mudança absoluta do nível do mar (que é a variável de interesse para estudos climáticos) das medições maregráficas é muito mais problemático. As medidas de maré, pelos marégrafos, têm duas limitações principais: (1) têm uma distribuição espacial pobre, estando localizadas apenas nas margens continentais e ilhas oceânicas, e (2) estão implantadas na superfície terrestre, que pode se mover verticalmente (CAZENAVE *et al.*, 1999).

Este movimento vertical ocorre, de fato, e são chamadas de marés terrestres, ou seja, a crosta terrestre se deforma como resultado da força gravitacional, do mesmo modo que ocorre com os oceanos, porém, em menor escala (BAKER, 1996). Esse fenômeno é difícil de ser medido, pois não há um ponto fixo na superfície terrestre que possa servir como referência, já que toda a superfície sofre deformação (AGNEW, 2007; MELCHIOR, 1983). Recentemente, as marés terrestres podem ser modeladas com uma precisão de poucos milímetros devido às observações realizadas na Terra, utilizando equipamentos como o gravímetro (HOOIJBERG, 2008). Outro movimento que tem grande influência na determinação

do NMM é o soerguimento da crosta, onde a interação oceano/continente introduz erros nas observações, e precisam ser modelados. Os movimentos das massas de água provocam alterações no campo gravitacional da Terra e a carga de água resulta em deslocamentos verticais adicionais (AGNEW, 2007). Uma tecnologia utilizada para modelar esse deslocamento é a utilização de uma estação GNSS (*Global Navigation Satellite System*), próximo ao marégrafo.

Estudos sobre maré terrestre e soerguimento da crosta, tem se tornado mais importante para a geofísica e geodésia, pois os satélites artificiais da Terra com finalidades geodinâmicas e posicionamento requerem órbitas determinadas com muita precisão, essas órbitas por sua vez sofrem influência das marés terrestres que causam perturbações adicionais no movimento dos satélites artificiais (PINTO, 2005). Além disso, o estudo de marés possui aplicações na engenharia, pois o aumento da precisão nas medidas requer correções dos efeitos de maré que antigamente eram ignorados (AGNEW, 2007). Nesta pesquisa a maré terrestre não será calculada e sua correção será negligenciada, uma vez que o objetivo é analisar o nível médio do mar sem as correções geodinâmicas e averiguar a acurácia e confiabilidade das medições maregráficas. Com as missões de altimetria por satélite, o Nível Médio do Mar Global (NMMG) e Regional (NMMR) é calculado de forma contínua desde janeiro de 1993. As fases de "verificação", durante as quais os satélites se alternam sucessivamente (Topex/Poseidon - Jason-1, Jason-1/Jason-2), ajudam a ligar essas diferentes missões. Outras missões também são utilizadas para calcular o nível médio do mar e melhorar a resolução espacial (AVISO, 2017).

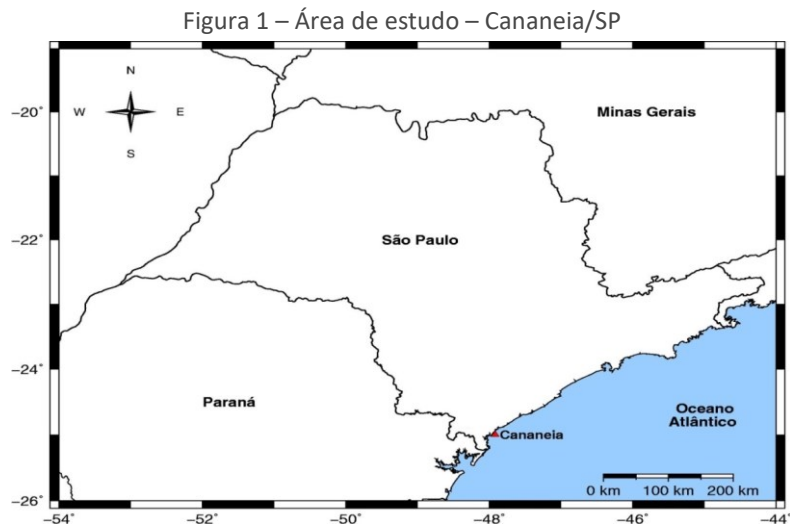
As tendências médias do nível do mar a partir dos dados dos modelos Global e Regional são recalculadas utilizando a modelagem geofísica unificada e um referencial terrestre ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) para toda a série temporal altimétrica, com órbitas consistentes baseadas em SLR (*Satellite Laser Ranging*) e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite*) (BECKLEY, 2007).

Por fim, segundo Mesquita (2009), as medições de nível do mar variam em correspondência a um conjunto grande de variáveis, à saber: (1) Variação Eustática, devido ao aumento, ou diminuição do volume de água doce. (2) Variação Halostérica, devido a variação da salinidade decorrente da variação do volume da água doce do mar. (3) Variação Estérica, variação de temperatura devido ao aquecimento, ou esfriamento da água do mar. (4) Variação Crustal, devido variação do nível da crosta em relação ao Centro da Terra. (5) Variação atmosférica, devido à variação de pressão atmosférica, aos ventos, e outras. (6) Variação Oceanográfica, devido as Ondas e Correntes Oceânicas e (7) Variação Astronômica, devido ao Sol e Lua (Marés) e o posicionamento de longo termo das órbitas dos planetas (causador das Glaciações) em relação à Terra, entre outras variáveis.

METODOLOGIA

O objeto de estudo é a estação maregráfica localizada na Base de Pesquisa "Dr. João de Paiva Carvalho", no município de Cananeia/SP, sob supervisão do Instituto Oceanográfico da USP (Universidade de São Paulo), onde a mesma possui vários equipamentos instalados para observações da variação oceânica e possível

movimentação da crosta terrestre, além de estudos voltados aos vários tipos de marés. A Figura 1 mostra o local do estudo.

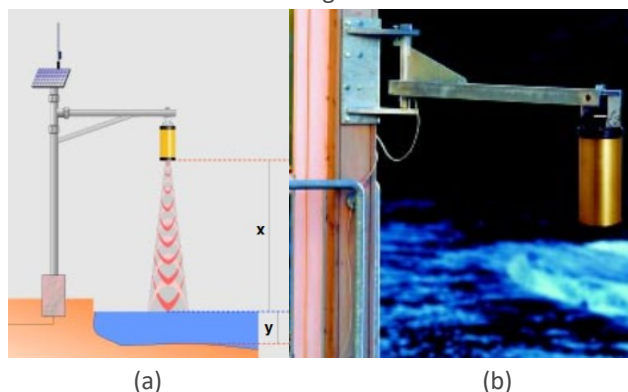


Fonte: Autoria própria (2017).

Em 2011 foi instalado um novo equipamento de leitura do nível do mar, um marégrafo com leitura do nível por radar (modelo Kalesto). A instalação desse novo marégrafo ocorreu devido à necessidade de modernização nas medições, e também pelo deslocamento da estrutura onde o marégrafo antigo estava instalado. O aparelho calcula a distância entre o sensor e a superfície da água (x) medindo o tempo entre a emissão de ondas e a detecção das mesmas ondas refletidas na superfície do mar e um registrador de dados/SP calcula o nível de água (y).

As especificações técnicas deste marégrafo informam que a precisão nominal do equipamento é de $\pm 10\text{mm}$ com resolução de 1mm (ELETROTEC, 2017). A Figura 2 mostra o funcionamento do marégrafo (a) e um modelo de instalação (b).

Figura 2 – (a) Funcionamento do Marégrafo Kalesto; (b) Modelo de Instalação do marégrafo



Fonte: Eletrotec (2017).

Foram utilizados cinco produtos distintos de quatro agências de processamento de dados do nível médio do mar baseado em altimetria por satélite, dentre eles, dois modelos globais e dois regionais, além das observações

sem correção geodinâmica do marégrafo instalado em Cananeia/SP. Os sites de cada agência onde se obteve os dados são apresentados:

- i. *Archiving Validation and Interpretation Satellite Oceanographic Center* (AVISO:
<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators-products/mean-sea-level.html>);
- ii. *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization* (CSIRO:
http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html);
- iii. *National Oceanographic and Atmospheric Administration* (NOAA:
https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lsa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timesteries_regional.php);
- iv. *Colorado University* (CU:
<http://sealevel.colorado.edu/content/regional-sea-level-timeseries>);
- v. *Global Sea Level Observing System* (GLOSS:
<http://www.goosbrasil.org/gloss/>) e Instituto Oceanográfico da USP (IO: <http://www.io.usp.br/>).

Os arquivos da série temporal de cada uma das agências citadas, formam adquiridos em suas respectivas páginas (*on line*), onde pode-se escolher o tipo de informação: gráficos, séries temporais (formato NetCFD ou ASCII) ou imagens (.png), dependendo da agência pode-se obter os dados separadamente para cada tipo de missão satelital. Neste artigo utilizou-se series temporais no formato ASCII e imagens.

Os modelos de nível médio do mar, global (AVISO e CSIRO) e regional (NOAA e CU), são baseados nos dados TOPEX/POSEIDON, ERS-2, GFO, JASON 1,2 e ENVISAT. Para os modelos regionais do NOAA e CU e o global AVISO, apenas as observações de altimetria entre 66° S e 66° N, foram utilizadas, já para o modelo global CSIRO as observações utilizadas estão entre 65° S e 65° N.

Para cada um dos modelos globais são aplicadas correções atmosféricas (por exemplo, barômetro invertido) e geofísicas (por exemplo, GIA – *Glacial Isostatic Adjustment*), exceto o NOAA que não tem a correção GIA. Maiores detalhes sobre as correções podem ser obtidos no site de cada agência. As quatro séries temporais do nível médio do mar (AVISO, NOAA, CU e CSIRO) são obtidas através da média direta dos dados da altura da superfície do mar ou da média dos dados distribuídos ao logo da órbita (por exemplo, AVISO e NOAA). Em todos os casos, é aplicada uma ponderação de área. Além do método da média geográfica, existem outras diferenças entre os conjuntos de dados do NMMG, por causa das correções geofísicas e instrumentais aplicadas e o número de satélites considerados (maiores detalhes sobre estas correções podem ser verificados em Henry *et al.* (2014) (DIENG *et al.*, 2015). O site do GLOSS possui vários marégrafos ativos onde os dados estão disponíveis no formato CSV (*Comma-separated values*), onde cada um dos marégrafos possui séries históricas distintas (de acordo com ano de sua instalação e funcionamento).

Em Cananeia os arquivos de observação de maré de 1954 a 2007 estão separados em dias com leituras de hora em hora com um total de 467.473

observações de maré, já as observações de 2012 a 2015 também estão separados em dias, porém com leituras a cada 3 minutos, totalizando 399.886 observações de maré. Dessa forma, teve-se o cuidado de compatibilizar as informações para que fossem utilizadas no software PACMARÉ (Previsão e Análise Harmônica de Marés e Correntes de Maré) foi desenvolvido por FRANCO (1988). O PACMARÉ é um software que utiliza as séries temporais horárias de nível do mar, porém as observações maregráficas são realizadas de 3 em 3 minutos, assim teve-se que realizar a compatibilização dos dados, utilizando-se apenas as observações realizadas em “hora cheia”, ou seja, de hora em hora. Dessa forma, o software poderia realizar a leitura do arquivo texto das observações. Ressalta-se que não realizou-se nenhum tipo de filtragem dos dados, apenas utilizou-se a observação maregráficas obtidas no equipamento.

As análises mensais foram baseadas em uma análise harmônica de 30 dias, totalizando 12 análises para cada ano (RIBEIRO, 2008). O software possui um conjunto de programas para análise e previsão de marés e correntes de maré, assim o módulo utilizado nesta pesquisa foi o “NMED”, que realiza o cálculo do nível médio do mar. As séries temporais horárias de nível do mar em Cananeia foram plotadas e verificadas computacionalmente através da técnica do teste harmônico, desenvolvida por KARUNARATNE (1980) e FRANCO (1982). Segundo Godin (1972), níveis médios diários, mensais, sazonais e anuais são calculados com a aplicação de um filtro passa baixa baseado em médias móveis: denotando A24 como o valor médio de 24 observações. As séries de observações foram submetidas ao filtro A24A25A25, de modo a remover as oscilações de maré. As leituras do nível do mar foram processadas e utilizaram-se os filtros disponíveis no software PACMARÉ desenvolvido por Franco e disponibilizado pelo Instituto Oceanográfico da USP (HARARI *et al.*, 2004).

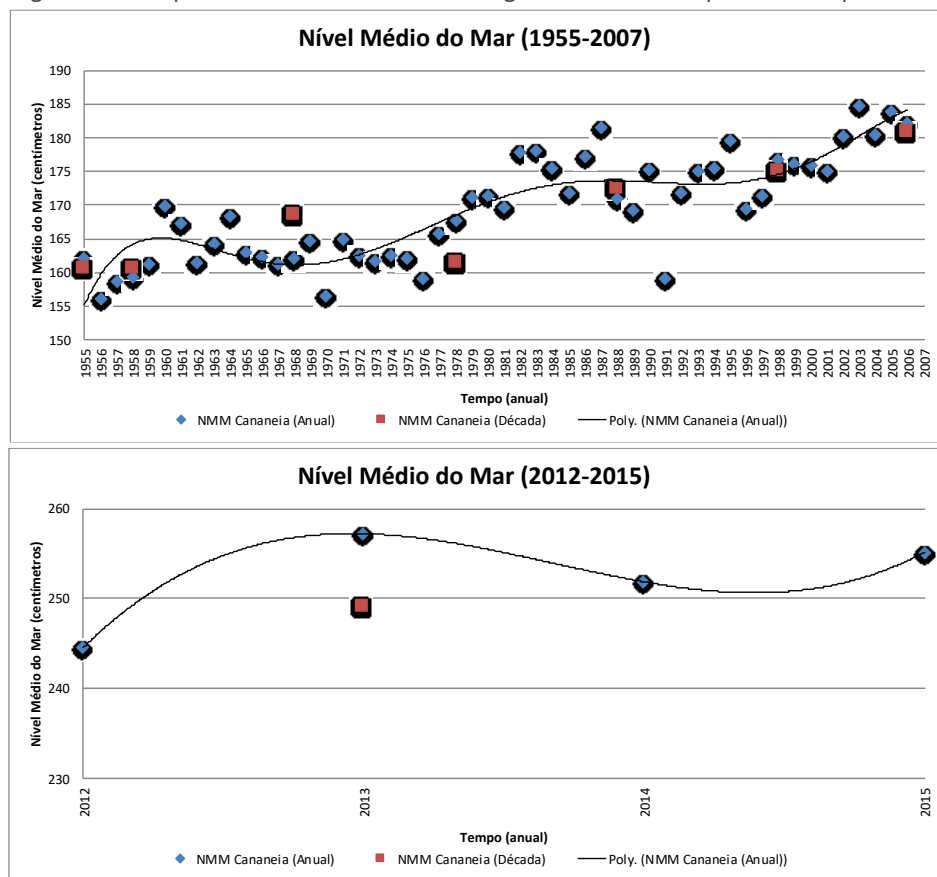
Para realizar-se as mesmas análises para os dois períodos, recorreu-se as observações de reconstrução do modelo global desenvolvido por desenvolvido por Church e White (2011), que refaz as observações do nível médio global de 1880 a 2013. Utilizou-se este modelo para verificar o comportamento do NMM em Cananeia no período de 1955-2007.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calculou-se o NMM a partir das observações maregráficas sem correções geodinâmicas de uma série histórica de dois períodos: 1955-2007 e 2012-2015 e analisou-se estes resultados com os modelos de nível médio do mar regional (NMMR - NOAA e CU) e global (NMMG - AVISO e CSIRO), estes quatro modelos já possuem as correções geodinâmicas. O primeiro período (1955-2007) as observações foram realizadas com marégrafo analógico e o segundo período (2012-2015) as observações são realizadas com marégrafo por radar. Existia uma diferença nas observações maregráficas de aproximadamente 5 centímetros até 1989, devido a um problema estrutural onde se encontra o marégrafo, mas em 2007 este problema foi solucionado. Sendo assim, mesmo com a troca do marégrafo, o sistema de referência do marégrafo permanece o mesmo (<http://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/726.php> - *Permanent Service form Mean Sea Level*).

A Figura 3 mostra o resultado do NMM obtido para os dois períodos separadamente: as barras em azul mostram o NMM ano a ano e os pontos vermelhos é o NMM para cada década (1950, 1960, 1970, 1980, 1990, 2000 e 2015). Verifica-se pela Figura 3 que o nível médio vem aumentando de forma gradual nos dois períodos, porém de forma estável, com valores para o primeiro e segundo período de 3,8mm/ano e 7mm/ano, respectivamente. A linha de tendência acompanha o comportamento do nível médio. Verificando-se o comportamento da linha de tendência dos dois períodos, nota-se que o ano de 2007 o valor do NMM é de ~190 cm e tem um salto em 2012 com valor de ~240 cm, este intervalo de ~50 cm se dá pela falta de observações maregráficas no período de 2008 à 2011, caso estas observações fossem adicionadas à análise, esse intervalo teria uma transição mais suave.

Figura 3 – Comportamento do NMM no marégrafo de Cananeia para os dois períodos

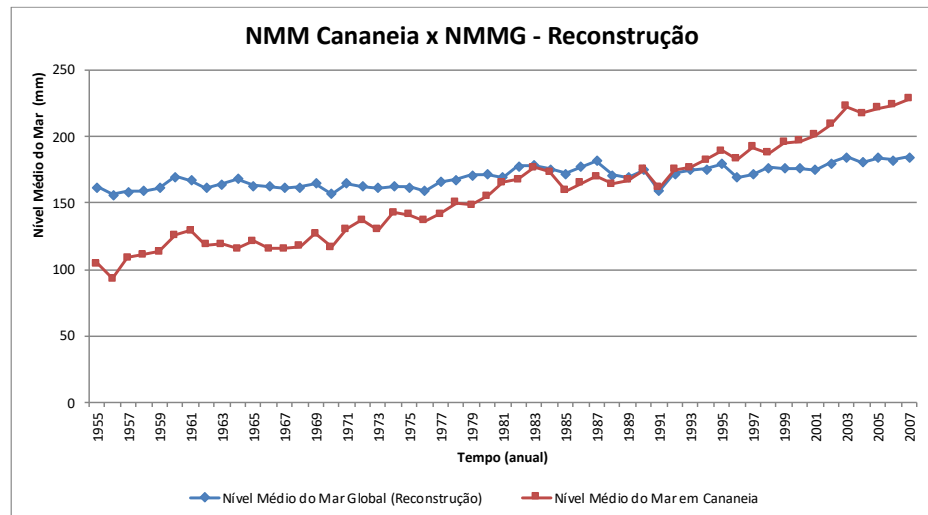


Fonte: Autoria própria (2017).

Como os dados de nível médio do mar a partir das observações dos satélites altímetros TOPEX/POSEIDON, ERS-2, GFO, JASON 1,2 e ENVISAT, regional e global, possuem um período de observações 1993 a 2007, foi necessária a utilização das observações da reconstrução do modelo global, que refaz as observações do nível médio global. Dessa forma, utilizou-se apenas o período das observações de 1955-1992. A Figura 4 mostra o aumento do modelo reconstituído, que segundo Church e White (2011) com tendência de 1,9 mm/ano, e verifica-se que o modelo reconstituído possui o mesmo comportamento do modelos globais AVISO e CSIRO (apresentado na Figura 5) com aumento total de 120 mm, já o NMM em Cananeia tem valor total no mesmo período de 40 mm. No início das medições maregráficas

de Cananeia (1955) quando comparado com o modelo reconstituído, os valores estão aproximadamente com 5 centímetros de diferença tendo uma aproximação gradual até 1983 onde as observações se mantêm praticamente iguais até 1993, quando os dados de satélite altimétricos já são realidade, e as diferenças começam a aumentar.

Figura 4 – Comportamento do NMM Cananeia x NMMG (Reconstrução)



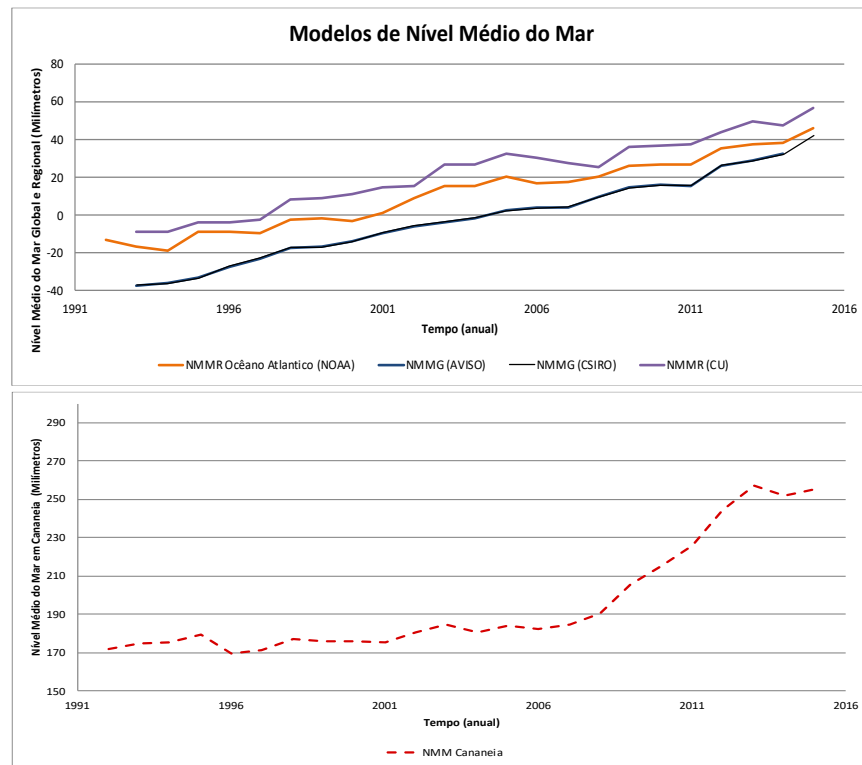
Fonte: Autoria própria (2017).

Outra análise realizada é a discrepância entre os modelos regionais (NMMR), modelos globais (NMMG) e o nível médio do mar em Cananeia (NMM Cananeia).

Na Figura 5, realizou-se a análise em dois gráficos distintos, em função das escalas serem diferentes por utilizarem-se de referencias distintas, nota-se que no início das missões de altimetria por radar a bordo de satélites a diferença entre os modelos Global (NMMG- linhas azul e preta) e Regional (NMMR- linhas roxa e laranja) é de ~15 mm. Porém com o aumento na acurácia dos modelos, os NMMG não possuem discrepância significativa entre si (se sobrepõem na Figura 5). A problemática em se realizar a análise com referencias diferentes, é que não se pode obter valores desta diferença diretamente, mas podemos analisar o comportamento do NMM para Cananeia e dos modelos global e regional dividindo-os nos dois períodos:

Observa-se na Figura 5 que a variação dos dois modelos global e regional de 1991 até 2007 tem uma variação de ~ 40 mm, e de ~ 20 mm para o NMM de Cananeia, de 2011 até 2015, o valor para os modelos global e regional possuem valores semelhantes, de ~ 20 mm, já para o NMM em Cananeia o valor é de ~ 12 mm para este mesmo período.

Figura 5 – Nível Médio do mar Regional, Global e de Cananeia



Fonte: Autoria própria (2017).

A Tabela 1 mostra a comparação apenas com os modelos regionais, para os dois períodos: 1º período de 1993-2007 e 2º período de 2012-2015. Para o modelo regional NOAA, verifica-se que este possui valores para o primeiro e segundo período de 3,16mm/ano e 5,14mm/ano, respectivamente. O modelo regional do CU, os valores são, respectivamente, 2,44mm/ano e 3,28mm/ano. Já o modelo global não possui valores separados por períodos, apenas o valor para a série histórica (1993-2015), sendo de 3,26mm/ano (AVISO) e 3,4mm/ano (CSIRO). Os valores do NMM de Cananeia para o primeiro período é de 3,85mm/ano e para o segundo de 7mm/ano, este aumento no valor pode ser atribuído pela falta de observações no período de 2008 a 2011. Nota-se (tabela 1) que os valores entre o modelo regional e o NMM de Cananeia têm a maior diferença de ~1,5 mm para o primeiro período e de ~ 3 mm para o segundo, o que mostra uma boa acurácia das observações do marégrafo.

Tabela 1 – Valores entre o Marégrafo de Cananeia e o modelo Regional

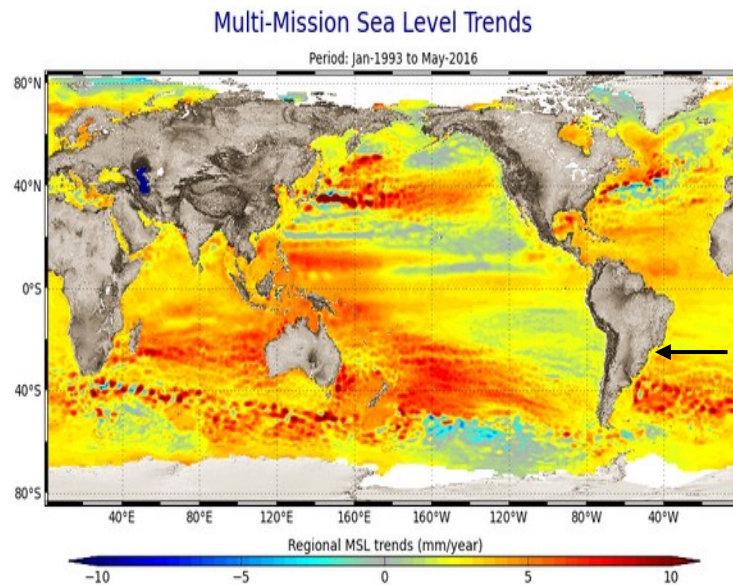
Modelos	1º Período	2º Período
Marégrafo Cananeia	3,85 mm/ano	7mm/ano
Modelo Regional (NOAA)	3,16mm/ano	5,14mm/ano
Modelo Regional (CU)	2,44mm/ano	3,28mm/ano

Fonte: Autoria própria (2017).

O registro da alteração do nível do mar a partir da altimetria por satélite possui uma série suficientemente longa para poder realizar a análise do aumento do nível do mar com bastante acurácia. A Figura 6 ilustra o NMM no mundo, e verifica-se

que no caso de Cananeia os valores estão coerentes (seta preta aponta a área de estudo, na escala está ente amarelo e laranja), ficando com os valores de tendência entre 2 e 5 milímetros.

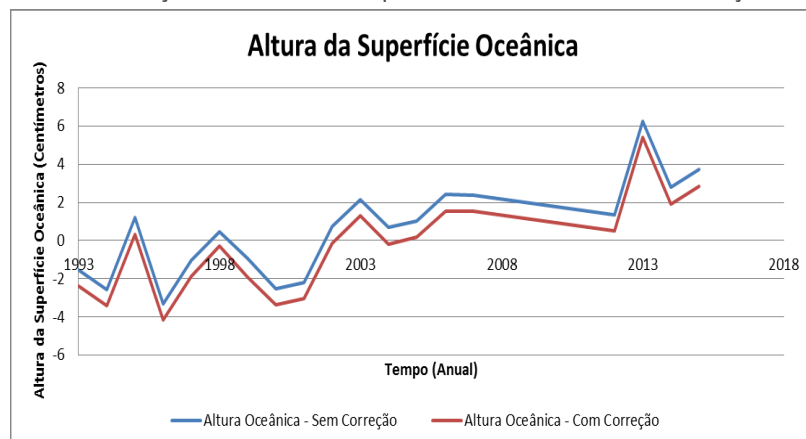
Figura 6 – Comportamento do NMM no marégrafo de Cananeia



Fonte: AVISO (2017).

A Figura 7 foi gerada através de observações dos satélites altimétricos processados pelo CU (<http://sealevel.colorado.edu/content/interactive-sea-level-time-series-wizard>), onde se obteve os dados para as coordenadas de Cananeia, com e sem as correções (por exemplo: correções geofísicas para as marés: oceânicas, polares e terrestres, além das correções atmosféricas: barômetro inverso e atmosférica dinâmica). Ao se comparar a resposta das observações satelitais com e sem as correções, vê-se que elas possuem diferenças significativas com valores de aproximadamente 1 cm. Claramente pode-se dizer que, as correções são necessárias quando se pretende analisar o NMM, uma vez que sem estas correções dos erros sistemáticos, tem-se uma incerteza muito grande nas medições principalmente quando se tratar de aplicações de alta resolução (como exemplo: obras portuárias).

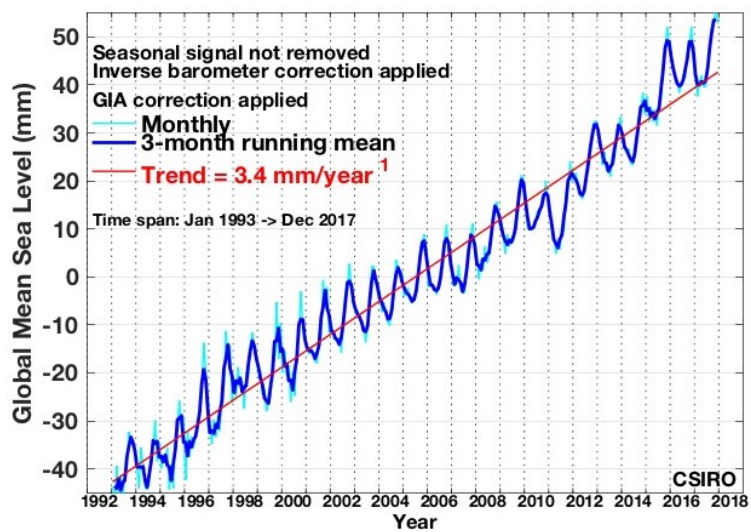
Figura 7 – Diferença entre altura da superfície do mar com e sem correção sazonal



Fonte: Autoria própria (2017).

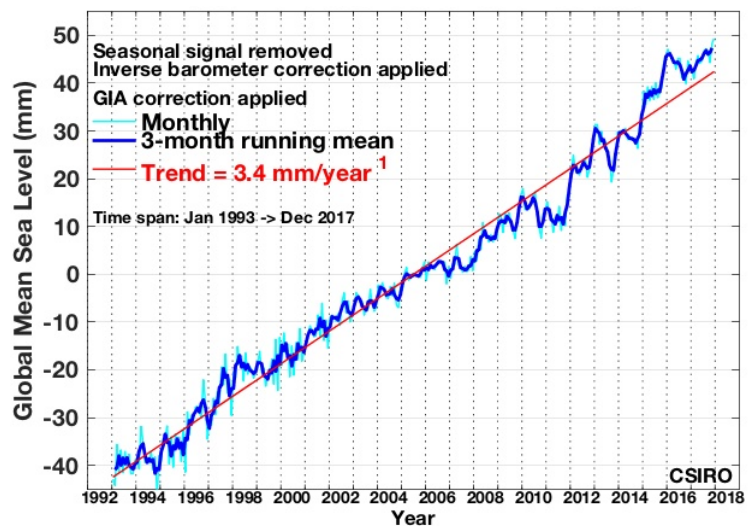
Para melhor exemplificar e quantificar a importância de não se aplicar as correções mencionadas, apresenta-se nas Figuras 8 e 9, as observações do NMM Global obtidas no sitio da CSIRO (http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html), onde nota-se que a amplitude das observações sem as correções (Figura 8) tem um valor médio de ~10 milímetros, e quando aplica-se à estas observações as correções (Figura 9), os erros sistemáticos são suavizados, passando a ter amplitude média de ~3 milímetros. Nas Figuras 8 e 9 apenas são aplicados as correções atmosférica (inverso do barômetro) e GIA, assim a maior correção vem das correções geodinâmicas, corroborando com o comportamento da altura da superfície oceânica na Figura 7.

Figura 8 – Nível Médio do Mar Global (sem correções)



Fonte: CSIRO (2017).

Figura 9 – Nível Médio do Mar Global (com correções)



Fonte: CSIRO (2017).

CONCLUSÃO

Neste estudo utilizou-se 5 conjuntos de dados (2 para o NMMG, 2 para o NMMR e 1 para as observações do NMM sem correção geodinâmica), para análise dos modelos globais e regional com as observações do marégrafo de Cananeia.

A despeito das dificuldades para obter-se valores sobre a razão de variação do nível médio do mar, não há dúvida que, nos dois períodos analisados, o nível do mar está aumentando no marégrafo de Cananeia, porém de forma gradual e estável, conforme ilustra a Figura 3. A análise numérica nos mostra que as observações do marégrafo de Cananeia possuem boa acurácia, principalmente quando se compara com o modelo regional (NOAA e CU), onde se percebe que os valores obtidos para o primeiro e segundo período são, respectivamente, ~ 1,5 mm e ~ 3 mm (Tabela 1). Já para os modelos globais (não possuem diferenças significativas entre si) não se pode realizar a análise por períodos, pois os mesmos apenas possuem valores para a série completa, o que dificulta obter valores concretos entre os modelos globais e o NMM em Cananeia. Verifica-se também que há uma grande discrepância entre os modelos globais e o regionais, com valor de ~15 milímetros, dessa forma, ao realizar-se trabalhos ou pesquisas relacionadas ao NMM em um marégrafo local, recomenda-se que se utilize dos modelos regionais para análise.

Claramente, pelos resultados numéricos obtidos e analisados, há necessidade de se realizar as correções geodinâmicas quando se compara o NMM de Cananeia com os modelos globais, mas quando analisa-se apenas o modelo regional vê-se que as observações maregráficas sem correções possuem boa acurácia, porém para aplicações de alta acurácia, ainda há a necessidade de realizarem-se as correções geodinâmicas. Portanto, os objetivos propostos foram alcançados através dos resultados apresentados e os modelos obtidos condizem com a realidade da estação maregráfica, onde o NMM em Cananeia obtido através de observações sem correções geodinâmicas possuem boa acurácia e tem pouca variação, onde se mantém um aumento contínuo do NMM ao longo do tempo.

Relative analysis of mean sea level in Cananeia/SP

ABSTRACT

The Currently the tide gauges used in the tide stations have high accuracy in their observations. A tide gauge model with good accuracy, called Kalesto is installed in the tide station of Cananeia/SP. The objective of this work is to perform the relative analysis of the Mean Sea Level (MSL) in this tide. The MSL was calculated from the tide observations without geodynamic corrections of two periods: 1955-2007 and 2012-2015 and analyzed these results with the regional mean sea level (NOAA and CU) and global (AVISO and CSIRO), these four models already have the geodynamic corrections. The MSL results, calculated, show that the mean level has been gradual and stable increased, with values for the first and second periods of 3.8mm/year and 7mm/year, respectively. When analyzing these values with the regional models, it is verified that these values have values for the first and second period of 3.16mm/year and 5.14mm/year (NOAA) and 2.44mm/year and 3.28mm/year (CU), respectively. The global model does not have values separated by periods, only the value for the historical series (1993-2015), being 3.26mm/year (AVISO) and 3.4mm/year (CSIRO). Nevertheless, it is seen that the observations without corrections have good accuracy, but for high-resolution applications there is a need to perform the geodynamic corrections.

KEYWORDS: Ocean Tide. Tide Gauge. Mean Sea Level.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem o IFSULDEMINAS pela liberação em tempo integral do primeiro autor para desenvolvimento do doutorado e a CAPES (PDSE processo nº 88881.132305/2016-01) pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

AGNEW, D. C.. Earth Tides. **Treatise On Geophysics And Geodesy**, New York, p.163-195, 2007.

AVISO. **Archiving Validation and Interpretation Satellite Oceanographic Center.: MEAN SEA LEVEL RISE.** 2017. Disponível em: <<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/ocean-indicators/products/mean-sea-level.html>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BAKER, T. F.; CURTIS, D. J.; DODSON, A. H.. A new test of Earth tide models in central Europe. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 23, n. 24, p.3559-3562, 1 dez. 1996. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/96gl03335>.

BECKLEY, B. D. *et al.* A reassessment of global and regional mean sea level trends from TOPEX and Jason-1 altimetry based on revised reference frame and orbits. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 34, n. 14, p.1-5, 28 jul. 2007. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2007gl030002>.

CAZENAVE, A. *et al.* Sea level changes from Topex-Poseidon altimetry and tide gauges, and vertical crustal motions from DORIS. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 26, n. 14, p.2077-2080, 15 jul. 1999. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/1999gl900472>.

CAZENAVE, A.; NEREM, R. S.. Present-day sea level change: Observations and causes. **Reviews Of Geophysics**, [s.l.], v. 42, n. 3, p.1-20, 2004. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2003rg000139>.

CHEN, J. L.; WILSON, C. R.; TAPLEY, B. D.. Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. **Nature Geoscience**, [s.l.], v. 6, n. 7, p.549-552, 2 jun. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1038/ngeo1829>.

CHURCH, J. A. *et al.* Sea Level Change: Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: CHURCH, J. A. *et al.* **Sea Level Change: Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.** Cambridge And New York: Cambridge University Press, 2013. p. 1137-1216.

CHURCH, J. A.; WHITE, N. J.. Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century. **Surveys In Geophysics**, [s.l.], v. 32, n. 4-5, p.585-602, 30 mar. 2011. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.

CSIRO. **Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.**: HISTORICAL SEA LEVEL CHANGES. 2017. Disponível em: <http://www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_hist_last_decades.html>. Acesso em: 15 jan. 2017.

CU. **Colorado University.**: Regional Sea Level Time Series. 2017. Disponível em: <<http://sealevel.colorado.edu/content/regional-sea-level-time-series>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

DIENG, H. B. *et al.* The Sea Level Budget Since 2003: Inference on the Deep Ocean Heat Content. **Surveys In Geophysics**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.209-229, 28 jan. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10712-015-9314-6>.

ELETROTEC. **KALESTO Water Level Sensor User Manual Kalesto-def Ott Hydromet GmbH.** 2017. Disponível em: <<https://fccid.io/OA6KALESTO/User-Manual/Users-Manual-FCC-radar-sensor-leaflet-129251.iframe>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

FRANCO, A. S.. Au sujet de la méthode de vérification des hauteurs horaires de marée de Karunaratne. **Révue Hydrographique Internationale**, Mônaco, v. 59, n. 1, p.151-155, 1982.

FRANCO A. S.. **Tides - Fundamentals, Analysis and Prediction.** 2. ed. São Paulo: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH), 1988. 249 p.

GODIN, G.. **The analysis of tides.** Liverpool: Liverpool University Press, 1972. 246 p.

GLOSS. **Global Sea Level Observing System:** 13 marégrafos no Brasil do Global Sea Level Observing System (GLOSS). 2017. Disponível em: <<http://www.goosbrasil.org/gloss/>>. Acesso em: 16 jan. 2017.

HARARI, J.; FRANÇA, C. A. S.; CAMARGO, R.. **Variabilidade de Longo Termo de Componentes de Marés e do Nível Médio do Mar na Costa Brasileira.** 2004. Afro-America Gloss News. Disponível em: <<http://www3.io.usp.br:32080/maptolab/aagn/aagn8/ressi/ressimgf.html>>. Acesso em: 06 jan. 2017.

HENRY, O. *et al.* Effect of the processing methodology on satellite altimetry-based global mean sea level rise over the Jason-1 operating period. **Journal Of Geodesy**, [s.l.], v. 88, n. 4, p.351-361, 24 dez. 2013. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-013-0687-3>.

HOOIJBERG, M.. **Geometrical Geodesy: Using Information and Computer Technology**. New York: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2008. 439 p.

IO - **Instituto Oceanográfico da USP**: Tabuas das marés. 2017. Disponível em: <<http://www.io.usp.br/index.php/tabuas-das-mares>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

JPL. **Jet Propulsion Laboratory: NASA's Topex/Poseidon Oceanography Mission Ends**. 2017. Disponível em: <<http://oceanmotion.org/html/gatheringdata/satellites.htm>>. Acesso em: 28 fev. 2017.

KARUNARATNE, D. A.. An improved method for smoothing and interpolating hourly sea level data. **International Hydrographic Review**, Mônaco, v. 57, n. 1, p.135-148, jan. 1980.

LEULIETTE, E.; WILLIS, J.. Balancing the Sea Level Budget. **Oceanography**, [s.l.], v. 24, n. 2, p.122-129, 1 jun. 2011. The Oceanography Society. <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2011.32>.

MELCHIOR, P.. **The Tides of the Planet Earth**. [S.l.]: Pergamon Press. 1983. 648 p.

MESQUITA, A. R.. **Considerações sobre as Variações do Nível do Mar do Litoral do Brasil no Século XX**,: Afro-America Gloss News Edição 13(1). 2009. Disponível em: <<http://www3.io.usp.br:32080/maptolab/aagn/aagn13/BrasilNivelMarAAGN.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2017.

NOAA. **National Oceanographic and Atmospheric Administration: Regional sea level time series**. 2017. Disponível em: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_regional.php>. Acesso em: 16 jan. 2017.

PINTO, J. V.. **Comparação de modelos para o cálculo de perturbações orbitais devidas à maré terrestre**. 2005. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

PSMSL. **Permanent Service form Mean Sea Level: Tide Gauge Data**. 2017. Disponível em: <<http://www.psmsl.org/data/obtaining/stations/726.php>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

STAMMER, D. *et al.* Causes for Contemporary Regional Sea Level Changes. **Annual Review Of Marine Science**, [s.l.], v. 5, n. 1, p.21-46, 3 jan. 2013. Annual Reviews. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-121211-172406>.

WÖPPELMANN, G. *et al.* Rates of sea-level change over the past century in a geocentric reference frame. **Geophysical Research Letters**, [s.l.], v. 36, n. 12, p.1-6, 24 jun. 2009. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2009gl038720>.

Recebido: 21 set. 2017

Aprovado: 22 mai. 2018

DOI: 10.3895/rbgeo.v6n3.7098

Como citar: ALBARICI, F. L.; GUIMARÃES, G. N.; TRABANCO, J. L. A.. **Análise relativa do nível médio do mar em Cananeia/SP. R. bras. Geom.**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 176-193, jul/set. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Fabio Luiz Albarici

Praça Tiradentes, 416, CEP 37576-000, Inconfidentes, Minas Gerais, Brasil.

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

