

Comparação da componente vertical GNSS determinada pelas soluções do SIRGAS e do NGL para propósitos de análise da variação do nível do mar em Imbituba-SC

Samoel Giehl¹, Regiane Dalazoana², Túlio Alves Santana³

^{1,2,3}Departamento de Geomática – Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (PPGCG) - Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba – PR – Brasil.

³Departamento de Infraestrutura (DINFRA) – Instituto Federal de Mato Grosso (IFMT) – Cuiabá – MT- Brasil.

samoelgiehl@gmail.com, regiane@ufpr.br, tulioalvessantana@gmail.com

Abstract. *The improvement of the Global Navigation Satellite System (GNSS) positioning allowed to observe the Earth's geophysical processes such as, the vertical crustal movements. These movements disturb the vertical component of the tide gauge position and, consequently, contaminate sea level observations. The present work analyzed the trends of vertical crustal movements in the Brazilian Vertical Datum in Imbituba-SC through the Geodetic Reference System for the Americas (SIRGAS) and the Nevada Geodetic Laboratory (NGL) solutions with the purpose of correcting the tide gauge data in Imbituba-SC. The results indicated a trend of subsidence of the crust and mean sea level rise.*

Resumo. *O aperfeiçoamento do posicionamento Global Navigation Satellite System (GNSS) permitiu observar processos geofísicos da Terra como o movimento vertical da crosta. Esses movimentos perturbam a componente vertical da posição dos mareógrafos e, conseqüentemente, contaminam as observações do nível do mar. O presente trabalho analisou as tendências de movimentos verticais da crosta no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC através das soluções do Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS) e do Nevada Geodetic Laboratory (NGL) com o propósito de corrigir os dados mareográficos em Imbituba-SC. Os resultados indicaram uma tendência de subsidência da crosta e elevação do nível médio do mar.*

1. Introdução

O aperfeiçoamento do posicionamento *Global Navigation Satellite System* (GNSS) permitiu o estabelecimento de um conjunto de estações geodésicas de alto desempenho e operação contínua que proporcionam a determinação de coordenadas com precisão milimétrica ao longo do tempo. Na Geodésia, o GNSS é amplamente empregado para determinar processos de deformação da Terra, como por exemplo, os movimentos de placas tectônicas e de deformação vertical da crosta. De acordo com [Dalazoana 2006], o monitoramento GNSS contínuo da posição geocêntrica de mareógrafos permite referenciar o nível do mar observado pelo mareógrafo num Sistema Geodésico de Referência (SGR) geocêntrico e, conseqüentemente, ser integrado com

observações de altimetria por satélite. Nessa direção, no Brasil, foram instaladas estações de monitoramento contínuo da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) nas proximidades de cada marégrafo da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG).

Segundo [IPCC 2021], o nível médio global do mar aumentou 0,20 m entre 1901 e 2018. A tendência média do aumento do nível do mar foi de 1,3 mm/ano entre 1901 e 1971, aumentando para 1,90 mm/ano entre 1971 e 2006, e aumentando ainda mais para 3,70 mm/ano entre 2006 e 2018. Esses valores indicam uma aceleração do aumento do nível do mar global com o decorrer dos anos e que deverá continuar ao longo do século XXI. Entre as principais causas desse aumento, destaca-se o aquecimento climático que provoca a perda de gelo do continente e a expansão térmica dos oceanos.

Os marégrafos, por estarem fixados na crosta terrestre, também registram movimentos tectônicos. Desse modo, quando se pretende determinar a variação do nível médio do mar, as observações maregráficas precisam ser corrigidas dos movimentos verticais da crosta. No Brasil, a discriminação dos movimentos da crosta baseada no uso combinado de observações maregráficas, de altimetria por satélite e da componente vertical GNSS, é um assunto que já vem a algum tempo sendo estudado principalmente no *Datum* Vertical de Imbituba-SC. Destacam-se os trabalhos de [Dalazoana 2006; Da Silva 2017 e Giehl 2020]. Desse modo, a ideia central do presente trabalho é analisar as diferenças de movimentos verticais da crosta no *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba (DVB-IMBT) determinadas a partir das soluções GNSS processadas pelos centros de processamento Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS) e do *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL) a fim de verificar as variações locais do nível do mar.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

As localizações do marégrafo (RMPG IMBT) e da estação GNSS (RBMC IMBT) em Imbituba-SC são apresentadas na Figura 1. Ambos os instrumentos se localizam a uma distância de, aproximadamente, 648 metros um do outro.

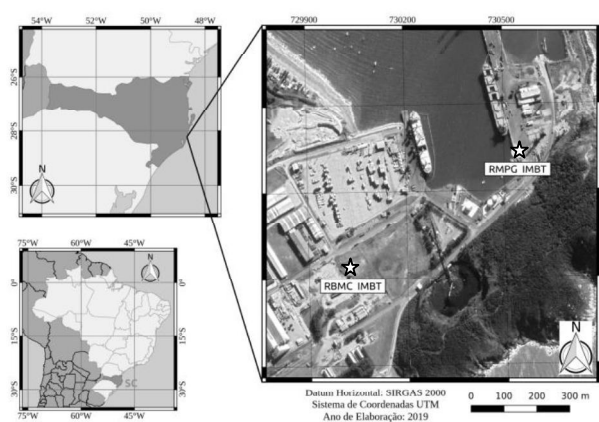


Figura 1. Localização do Marégrafo da RMPG e da Estação GNSS da RBMC em Imbituba-SC

2.2. Rede SIRGAS-CON

Atualmente, o SIRGAS está materializado por uma rede ativa de cerca de 400 estações GNSS distribuídas nos países do continente americano, formando a rede SIRGAS-CON, cujo objetivo é fornecer coordenadas (associadas a uma época de referência específica) e suas variações ao longo do tempo (velocidades das estações) [SIRGAS 2021]. No Brasil, todas as estações da RBMC fazem parte da rede SIRGAS-CON. O estabelecimento e manutenção de estações da RBMC são de responsabilidade do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e sua situação operacional é redimensionada por questões logísticas dentro do próprio IBGE, sendo suas estações subdivididas em: estações operantes; estações em estado de advertência; estações inoperantes; e estações inativas [IBGE 2021b].

As coordenadas das estações da rede SIRGAS-CON são processadas semanalmente visando à estimação da posição semanal instantânea e estão associadas a diferentes épocas e referidas a diferentes soluções do *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF). Desse modo, para analisar a variação temporal das coordenadas semanais é necessário reduzir à mesma época de referência e à mesma realização. Após realizar esse procedimento, as coordenadas são compatíveis ao nível milimétrico [SIRGAS 2021].

Para aplicações práticas e científicas que requeiram a variação das coordenadas de referência ao longo do tempo, o SIRGAS disponibiliza as soluções multianuais (coordenadas + velocidades) [SIRGAS 2021]. As coordenadas provenientes da solução multianual referem-se ao ITRF mais atual e uma época específica de referência. No presente trabalho, foi empregada a solução multianual SIRGAS para a estação da RBMC de Imbituba-SC denominada de SIR17P01 alinhada ao IGS14, época 2015.0 e associada ao período que compreende desde 17/04/2011 a 28/01/2017 [Sánchez 2017]. A tendência de movimento vertical da crosta já é fornecida pela solução SIR17P01.

2.3. Soluções GNSS diárias NGL

O *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL), fornece soluções diárias GNSS, denominadas de NGL14, que são processadas pelo *software* GipsyX (*versão 1.0*) do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). São fornecidas soluções para mais de 17.000 estações distribuídas globalmente [Blewitt, Hammond, e Kreemer 2018a].

O método de processamento utilizado pelo NGL é o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) e os dados são vinculados ao referencial IGS14 (ITRF2014) com base na posição da época de 2013,9713. Mais detalhes pertinentes à estratégia de análise de dados GNSS empregada para se obter a solução NGL14 podem ser vistos em [Blewitt, Hammond, e Kreemer 2018b]. O *Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales* (SONEL) armazena as soluções GNSS geradas pelo NGL.

2.4. Tratamento matemático dos dados maregráficos

Após a aquisição dos dados maregráficos de Imbituba-SC da RMPG [IBGE 2021a] foram removidos os valores discrepantes (*outliers*) de nível d'água por meio

da regra $\pm 3\sigma$ e o preenchimento das lacunas por meio de marés sintéticas (MSs) produzidas a partir dos valores observados pelo marégrafo digital de Imbituba-SC, entre março de 2002 a dezembro de 2015. Mais informações sobre as MSs podem ser vistas em [Kelley 2019]. A escolha do período da série maregráfica de 2002 a 2015, deve-se ao fato dos dados não apresentarem nenhum indício de alteração na referência de origem das leituras (ou seja, do zero do marégrafo). Constatou-se uma presença de 0,28% de *outliers* contidos na série temporal maregráfica.

Após o preenchimento das lacunas pelas MSs, os dados maregráficos foram corrigidos dos efeitos atmosféricos de alta e baixa frequências, a partir do modelo *Dynamic Atmospheric Corrections* (DAC). [Fenoglio-Marc, Braitenberg, e Tunini 2012; Cipollini et al. 2016] realizaram a correção dos efeitos atmosféricos nos dados maregráficos a partir do modelo global DAC, que consiste na resposta barotrópica do oceano às forças de vento e pressão atmosférica estimadas pelo modelo Mog2D-G por períodos inferiores a 20 dias e a aproximação do barômetro inverso por períodos mais longos. O modelo de DAC é produzido pela Divisão de Oceanografia Espacial do *Collecte Localization Satellites* (CLS) e sua distribuição é realizada pela *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data* (AVISO) [Bosch, Dettmering e Schwatke 2014]. Na sequência, aplicou-se o filtro passa-baixa, por meio do desenvolvimento de um *script* em linguagem R, para a remoção das altas frequências restantes nas observações maregráficas descrito por [Pugh 1987]. Por fim, aplicou-se a regressão linear para determinar a tendência de variação do nível do mar observado pelo marégrafo de Imbituba-SC.

3. Resultados

Nas soluções GNSS, após a aquisição dos dados, também foram removidos os valores discrepantes (*outliers*) por meio da regra $\pm 3\sigma$ e então aplicado um modelo de regressão linear. Observou-se que a tendência de movimento vertical da crosta em Imbituba-SC para o período entre 17/04/2011 e 28/01/2017, corresponde a $-2,0 \pm 0,70$ mm/ano de acordo com solução SIR17P01 [Sánchez e Hermann 2017] e de $-1,55 \pm 0,09$ mm/ano conforme a solução NGL. A Figura 2 apresenta a tendência de movimento vertical da crosta, obtida a partir das soluções diárias do NGL.

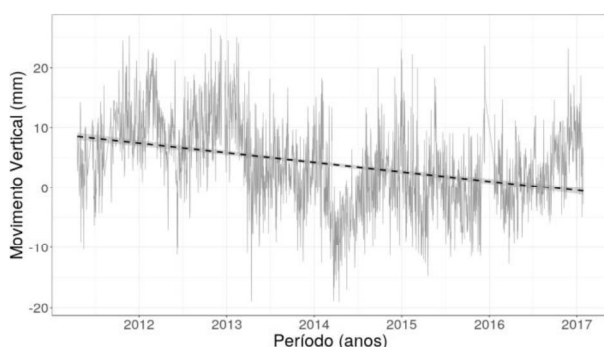


Figura 2. Tendência de movimento vertical da crosta a partir dos dados NGL entre 2011 e 2017.

As soluções do NGL apresentam algumas vantagens em relação às soluções

SIRGAS como uma maior resolução temporal (diária) e o modo de processamento utilizado pelo NGL é o PPP, o qual gera soluções menos dependentes das estações fiduciais.

Ao analisar a reta de regressão dos dados maregráficos entre 2002 e 2015, conforme apresentado na Figura 3, verificou-se uma tendência de aumento do nível médio do mar de $5,42 \pm 1,88$ mm/ano. Destaca-se que, aproximadamente entre a metade de 2013 e a metade de 2014 houve uma aparente redução do nível do mar e na sequência uma elevação. Desse modo, é importante que a análise do nível médio do mar contemple o maior período de tempo possível. Além disso, fazem-se necessários maiores estudos acerca de possíveis efeitos instrumentais na série temporal de dados maregráficos.

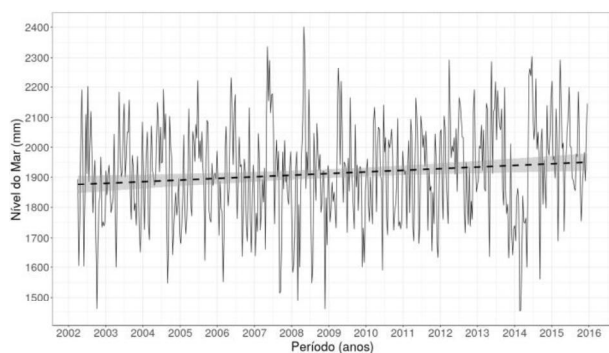


Figura 3. Tendência do nível do mar em Imbituba-SC de 2002 a 2015.

Levando em conta a variação do movimento vertical da crosta, obtida a partir dos dados GNSS, constatou-se uma elevação do nível médio do mar em Imbituba entre 2002 e 2015 de $3,87 \pm 1,88$ mm/ano e $3,42 \pm 2,00$ mm/ano aplicando as correções do NGL e SIR17P01, respectivamente. Destaca-se que os períodos de tempo das séries maregráficas e GNSS são diferentes.

4. Considerações Finais

Verificou-se um movimento vertical da crosta em Imbituba-SC no sentido descendente (subsidência) tanto para as soluções do SIRGAS quanto do NGL de $-2,0 \pm 0,70$ mm/ano e $-1,55 \pm 0,09$ mm/ano, respectivamente. Os resultados indicaram uma diferença de 0,45 mm/ano entre os resultados obtidos a partir dos centros de processamento GNSS, no entanto, destaca-se a solução NGL por apresentar uma resolução diária e o método o processamento utilizado é o PPP, o qual gera soluções menos dependentes das estações fiduciais.

Em relação aos dados maregráficos, observados entre 2002 e 2015, verificou-se a elevação do nível do mar em Imbituba-SC.

Referências

Blewitt, Geoffrey, William C. Hammond e Corné Kreemer (2018a). *Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science*. In: Eos 99. DOI: 10.1029/2018EO104623.

- Blewitt, Geoffrey, William C. Hammond e Corné Kreemer (2018b) *NGL/UNR GPS Data Analysis Strategy and Products Summary*. URL: <http://geodesy.unr.edu/gps/ngl.acn.txt> (visited on 05/20/2020).
- Bosch, Wolfgang, D. Dettmering, e C. Schwatke (2014). *Multi-Mission Cross-Calibration of Satellite Altimeters: Constructing a Long-Term Data Record for Global and Regional Sea Level Change Studies*. In: Remote Sensing 6.3, pp. 2255–2281. DOI: 10.3390/rs6032255.
- Cipollini, Paolo, Francisco M. Calafat, Svetlana Jevrejeva, Angelique Melet e Pierre Prandi (Nov. 2016). *Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges*. In: Surveys in Geophysics 38.1, pp. 33–57. DOI: 10.1007/s10712-016-9392-0.
- Da Silva, L. M. (2017). *Análise da evolução temporal do datum vertical brasileiro de Imbituba*. PhD thesis. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 272.
- Dalazoana, R. (2006). *Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro*. PhD thesis. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 202.
- Fenoglio-Marc, L., C. Braitenberg, e L. Tunini (Jan. 2012). *Sea Level Variability and Trends in the Adriatic Sea in 1993–2008 from Tide Gauges and Satellite Altimetry*. In: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 40-41, pp. 47–58. DOI: 10.1016/j.pce.2011.05.014.
- Giehl, S. (2020) *Determinação de movimentos verticais da crosta por meio da integração de observações maregráficas e da altimetria por satélite no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba no período de 2002 a 2015*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p. 109.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021a) *Rede Maregráfica Permanente para a Geodésia*, URL: <https://www.ibge.gov.br/> (visited on 20/08/2021).
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021b) *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS*, URL: <https://www.ibge.gov.br/> (visited on 02/11/2021).
- IPCC (2021). *“Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”*. In: [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu e B. Zhou (eds.)] In: Press. Cambridge University Press.
- Kelley, D. E. (2019). *Analysis of Oceanographic Data*. URL: <https://www.rdocumentation.org/packages/oce/versions/1.1-1> (visited on 10/20/2019).
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. Swindon: John Wiley Sons, p. 472.
- Sánchez, L. (2017). *“Kinematics of the SIRGAS Reference Frame”*. In: Symposium SIRGAS 2017 (Mendoza, Argentina). Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), Technische Universität München.
- Sánchez, Laura e Hermann Drewes (2020). *SIRGAS 2017 Reference Frame Realization SIR17P01*. data set. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut der Technischen Universität München. DOI: 10.1594/PANGAEA.912349. URL: <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.912349>.
- SIRGAS, Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (2019). *Sistema de Referência Geocêntrico para las Américas (SIRGAS)*. URL: <http://www.sirgas.org> (visited on 10/07/2021).