

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA ACURÁCIA ABSOLUTA DA REFLETOMETRIA GNSS NA MEDIÇÃO DO NÍVEL DA ÁGUA

MANUELLA ANAÍSRDRIGUESFAGUNDES
FELIPE GEREMIANIEVINSKI

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia - CEP SRM
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PPGSR
manuella.fagundes@ufrgs.br, felipe.nievinski@ufrgs.br

RESUMO - A técnica da refletometria GNSS (GNSS-R) é uma nova possibilidade de instrumento para medição do nível do mar em áreas costeiras bem como o nível de rios e de outros corpos d'água. Apresenta vantagens com relação a marégrafos e linígrafos convencionais por não exigir visada perpendicular à água e adotar um referencial geocêntrico. A maioria das avaliações de anteriores reportadas na literatura foi feita de forma relativa, ignorando a discrepância média entre GNSS-R e outras técnicas, focando apenas na maré e outras variações temporais. O objetivo deste artigo foi avaliar de forma absoluta, ou seja, considerando o possível viés no uso da técnica de refletometria. Um experimento preliminar foi realizado no Lago Guaíba (Porto Alegre RS), com 2,5 h de duração. Os resultados GNSS-R foram comparados com aqueles advindos de nível óptico e régua. Nessa avaliação preliminar, a estimação foi realizada de forma visual/manual e considerando apenas dois satélites. Ao compararmos os resultados das duas metodologias envolvidas, a discrepância encontrada foi da ordem de 15 cm ou cerca de 4% da altura média de 360 cm. Como trabalhos futuros, pretende-se coletar uma série temporal mais longa, automatizar a estimação GNSS-R. Também se espera obter dados adicionais de validação.

ABSTRACT - The technique of reflectometry using GNSS (GNSS-R) is a new instrument possibility of a water level measuring in coastal areas such as the level of rivers and other water bodies. It has advantages over conventional tide gauges because it does not require a perpendicular view of the water and adopt a geocentric reference. Most of the previous assessments reported in the literature were done in relative way, ignoring the average discrepancy between GNSS-R and other techniques, focusing only on tide and other temporal variations. The objective of this article was to evaluate absolutely, that is, considering the possible bias in the use of the technique of reflectometry. A preliminary experiment was carried out at Lago Guaíba (Porto Alegre RS), with 2.5 h of duration. The GNSS-R results were compared with those derived from optical level and ruler. In this preliminary evaluation, the estimation was performed visually / manually and considering only two satellites. When comparing the results of the two methodologies involved, the discrepancy was of the order of 15 cm or about 4% of the average height of 360 cm. As future work, we intend to collect a longer time series, automate the GNSS-R estimation. It is also expected to obtain additional validation data.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças ocorridas no nível do mar podem ser causadas por fenômenos de natureza oceanográfica ou terrestre, que são ou não de influência antrópica. Pesquisas são realizadas em diversas áreas com a finalidade de compreender as raízes do problema e sugerir providências, visto que o aumento do nível do mar pode atingir toda a região costeira do planeta. A Oceanografia e a Geodésia tornaram-se ferramentas de grande importância neste sentido, contribuindo para projetar perspectivas realistas.

No Brasil o órgão responsável pela implantação e manutenção do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) é o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Este possui redes de referência que apoiam o posicionamento geodésico, entre elas a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) de Sistemas de Navegação Global por Satélites (GNSS), bem como a Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG). A RBMC é composta por um conjunto de estações equipadas com receptores e antenas GNSS que medem coordenadas com alta precisão. Já a RMPG consiste em um conjunto de estações que medem o nível do mar, cujo objetivo consiste em monitorar a relação entre o referencial altimétrico brasileiro e outros referenciais verticais locais, além de subsidiar os estudos de modernização das altitudes brasileiras e de variação do nível do mar. A rede altimétrica passiva é composta por referências de nível, que são estações

de altitude conhecida, e que materializam a componente altimétrica do SGB a partir de medições de nivelamento geométrico de alta precisão.

Estudos relativos à modernização do Sistema Altimétrico Brasileiro como Da Silva e Freitas (2017), propõem a adoção de um Referencial Vertical Moderno. Isto ocorre devido às diferenças nas medições causadas pela dinâmica do planeta, onde ao considerar-se um referencial altimétrico regional, torna-se inviável comparar dados de forma mais abrangente. Porém para implantação deste referencial altimétrico global deve-se considerar os aspectos geodinâmicos, como discriminar movimentos eustáticos e tectônicos, monitorar a posição geocêntrica dos marégrafos costeiros e a variabilidade temporal.

O acomodamento do terreno na região do marégrafo pode mascarar possível indicativo de elevação ou rebaixamento do nível do mar (Freitas e Luz, 1995). Nesse sentido, um aspecto de extrema importância é a fixação da posição geocêntrica do marégrafo, sendo que o monitoramento contínuo desta posição pode discriminar movimento crustal e alterações do nível médio do mar (NMM). Segundo Freitas et al. (2002a), as posições geocêntricas dos marégrafos servem como condição inicial para relacionar o NMM local a um geóide global.

Atualmente as redes maregráficas tradicionais enfrentam uma série de dificuldades, como a movimentação dos instrumentos, descontinuidade de observações e a necessidade de correção das derivas. A observação é complicada, e não ocorre com a regularidade desejável. O nível médio do mar pode ser obtido também através de satélites altimétricos, e a associação desta informação com um geóide global torna possível calcular a topografia da superfície do mar. Porém em regiões costeiras há perda de resolução e os dados não são precisos, dificultando bons resultados nestas áreas. Cipollini et al. (2016) descreve o monitoramento do nível do mar na costa com satélites altímetros e conclui sobre a necessidade de haver modelos mais sofisticados para medições em zonas costeiras. Relata que dados entre 10 a 50 km da costa, dependendo do equipamento e da morfologia, as medidas são consideradas defeituosas e então descartadas.

Conforme Bevis et al. (2001) há necessidade de inserir um GNSS convencional junto ao marégrafo, com a finalidade de se obter posicionamento vertical em um referencial geocêntrico, tornando possível o controle dos movimentos geofísicos locais. Isto torna possível obter uma coordenada para o marégrafo, viabilizando mensurar mais precisamente as diferenças encontradas no nível do mar por possíveis erros oriundos de registros de marégrafos, relacionados às dificuldades de sua manutenção. Um marégrafo/linígrafo, apesar de apresentar vantagens por ser uma técnica difundida, necessita de um GNSS acoplado para permitir que se tenha um controle sobre a movimentação do solo, ou seja, sobre as influências sobre o terreno. Com a instalação de um GNSS em áreas costeiras, surge a possibilidade de medição do nível do mar indiretamente por técnicas de refletometria (GNSS-R). É um tipo sensoramento remoto à curta distância que consiste em usar reflexões das ondas de rádio emitidas pelos satélites GNSS para calcular as variações de nível da água. Possibilita empregar os receptores da RBMC como marégrafos alternativos, complementando e ampliando a rede RMPG (MAKRAKIS et al., 2017; SILVA et al., 2014). A técnica de refletometria revela uma nova possibilidade de instrumento de medição do nível da água e apresenta vantagens por não necessitar estar imediatamente sobre a água (ou seja, não exigir visada perpendicular), por adotar um referencial geocêntrico e também em termos de custo. A maioria das avaliações anteriores da técnica de GNSS-R foram relativas, no sentido em que a diferença média com relação à marégrafos foi ignorada. Aqui propomos uma avaliação absoluta, para identificar um possível viés altimétrico em GNSS-R (SANTAMARÍA-GÓMEZ et al., 2015). Para tal empregamos a técnica de nivelamento geométrico, com notória precisão entre as técnicas para determinar altitudes com rigor (IBGE, 1983). O objetivo consiste em comparar de forma absoluta o desnível entre o centro de fase da antena GNSS obtida utilizando refletometria e o desnível encontrado através do nivelamento geométrico, in loco.

2 METODOLOGIA DO TRABALHO

2.1 Levantamento de campo

A área de estudo localiza-se no Cais Mauá, à beira do Lago Guaíba, no município de Porto Alegre (RS). Esse local foi escolhido devido à proximidade da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Foi utilizado um dispositivo GNSS com receptor e antena integrados, marca *Topcon* e modelo *Hiper Lite Plus*. As condições para melhor aproveitamento dos dados do GNSS consistem no estacionamento da antena em um local com campo de visada aberto e sem obstruções, o mais próximo possível do corpo d'água e com visibilidade para o céu, para que não haja bloqueio da recepção do sinal dos satélites. Na Figura 1 é possível observar que as condições foram atendidas para o receptor utilizado. Conforme apresenta a Figura 1 o GNSS foi colocado o mais próximo possível da borda do cais, para que o mesmo recebesse sinal de satélites em diferentes altitudes e obtivesse mais possibilidade de receber o sinal refletido da água. O tempo de rastreamento foi de cerca de 2,5 h.

Figura 1 – Antena estacionada.



Fonte: Autores (2018)

Com relação à técnica de nivelamento geométrico, ela é bem consolidada e utilizada em levantamentos geodésicos de alta precisão. Quando aplicada corretamente, gera resultados com erros inferiores a $0,5\text{mm}\sqrt{D}$, onde D é a distância em km (IBGE, 1983). Foram tomados os cuidados usuais para evitar a ocorrência e propagação de erros sistemáticos conforme (IBGE, 1983). Os materiais utilizados foram um nível eletrônico DL-202 e régua com código de barras. Foi lida a régua na altura do ponto de referência da antena GNSS (ARP) e na altura da água. A parte inferior da régua foi colocada em contato direto com a lâmina d'água, a qual estava calma, como pode ser observada na Figura 2, com agitação por ondas inferior a 5 cm, sendo essa a principal fonte de incerteza da medição. Assim, obteve-se o desnível entre o ARP do GNSS e a superfície da água. Posteriormente, considerando-se as constantes do dispositivo GNSS, obteve-se o valor em relação ao centro de fase (APC) do dispositivo GNSS e a lâmina d'água.

Figura 2 - Lâmina d'água



Fonte: Autores (2018)

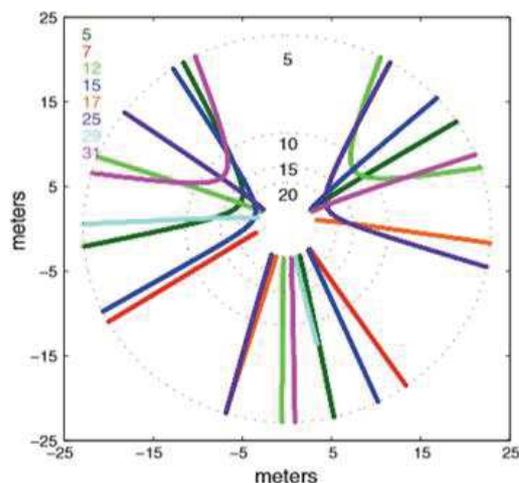
2.2 Modelos refletométricos

A área coberta pela reflexão do sinal está diretamente relacionada ao ângulo de elevação do satélite; quanto menor for a elevação, maior e mais distante da antena será a área coberta pelo satélite. De acordo com Larson e Nievinski (2013), a distância radial ao ponto de reflexão especular é aproximadamente:

$$R = \frac{h}{\text{tg}(e)} \quad (1)$$

onde h é a altura da antena e e é o ângulo de elevação do satélite. A Figura 3 mostra um exemplo genérico dos pontos de reflexão, em metros, de acordo com a direção do satélite, tanto em azimute quanto em ângulo de elevação (não necessariamente válido especificamente para o local levantado).

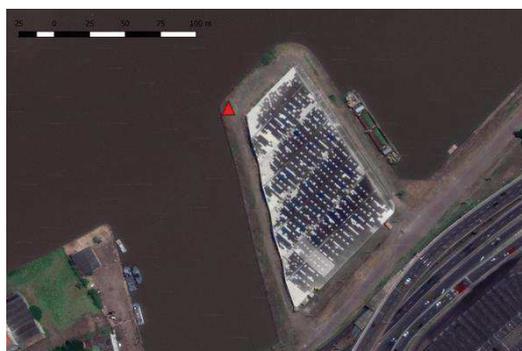
Figura 3 - Pontos de reflexão nominais



Fonte: Larson e Nievinski (2013)

A localização do dispositivo GNSS, identificado com um triângulo vermelho na Figura 4, é tal que os satélites em trajetória N-NO e S-SO serão refletidos pela água. Já os satélites que tiverem durante o tempo de rastreamento um trajeto S-SE e N-NE serão refletidos pela terra, o que para este trabalho pode ser desconsiderado.

Figura 4 - Localização do dispositivo GNSS



Fonte: Google Earth (2018)

O principal tipo de observação utilizado em refletometria GNSS é a razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio*, SNR). De acordo com Nievinski e Larson, (2014a; 2014b), a estimativa da altura da antena com relação à superfície da água pode se dar mediante o ajustamento do SNR a uma curva teórica. Utilizando uma tendência ajustada por polinômio, determina-se o SNR residual pela diferença entre o SNR original e a sua tendência. O SNR residual, por sua vez, exibe uma oscilação, cuja frequência com relação ao seno do ângulo de elevação é constante para uma superfície refletora horizontal. Essa frequência angular modificada pode ser expressa conforme a Equação 2:

$$f = \frac{\partial \phi}{\partial \text{sine}} = \frac{4\pi H}{\lambda}, \quad (2)$$

onde λ é o comprimento da onda de rádio portadora do GNSS e H é o desnível entre a antena e a superfície da água. Pode-se inverter a expressão da Equação 2 para estimar a altura H como incógnita:

$$H = \frac{v\lambda}{2} \quad (3)$$

onde $v = f/(2\pi)$. A frequência ordinária modificada v pode ser estimada visualmente contando o número de ciclos no SNR residual e dividindo esse número pela extensão do intervalo de ângulos de elevação observados. Por exemplo, se há duas oscilações e meia entre 5 e 10 graus de elevação, a frequência seria

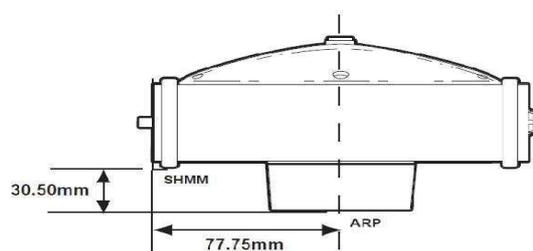
$$v = \frac{2,5}{\text{sen}(10^\circ) - \text{sen}(5^\circ)} \quad (4)$$

ou aproximadamente 28,9; multiplicando por meio comprimento de onda na banda L1 ($\frac{19}{2}$ cm), obtém-se uma altura estimada de 2,745 m.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado obtido por nivelamento geométrico incluiu as constantes do receptor/antena especificadas na Figura 5. Esta ilustra as alturas envolvidas no cálculo da altura do centro de fase.

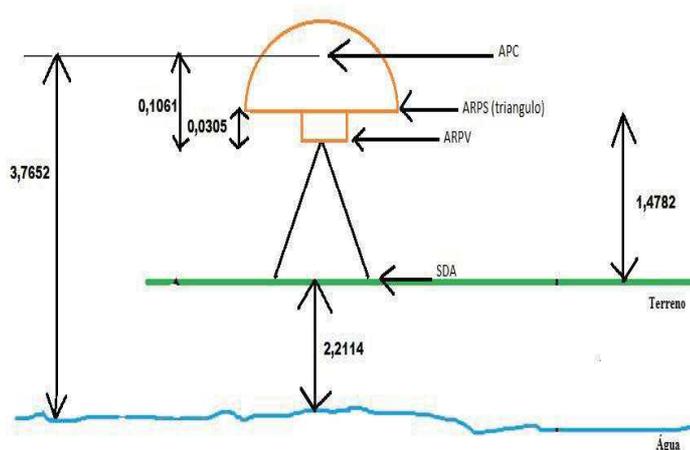
Figura 5 - Constantes do dispositivo GNSS



Fonte: Manual do equipamento.

Na Figura 6 há o esboço do nivelamento realizado, apresentando todos os valores obtidos. A altura em relação à água foi medida de forma vertical e não inclinada, portanto este valor não precisou ser convertido usando o semidiâmetro do dispositivo GNSS. Assim, através do emprego da técnica de nivelamento geométrico obteve-se uma diferença de altura entre o centro de fase da antena (APC) e a água ($\Delta h'$) de 3,7652m.

Figura 6 – Vários níveis altimétricos envolvidos.

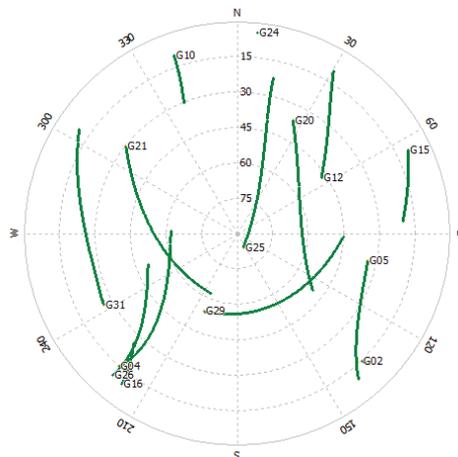


Fonte: Autores (2018)

Para refletometria, utilizou-se os dados SNR coletados pelo dispositivo GNSS. Para a análise visual do SNR utilizou-se o pacote de software de código aberto RTKLIB. Este suporta diversos GNSS, incluindo GPS, GLONASS,

Galileo e Beidou (TAKASU, 2013). Mas especificamente, foi utilizado o programa RTKPLOT para exibir a trajetória dos satélites rastreados pelo receptor e a respectiva SNR, onde pode-se observar o comportamento ao longo de todo o período de medição. A Figura 7 mostra a distribuição dos satélites rastreados pelo receptor e suas trajetórias. Confrontando com a Figura 4, é possível concluir que os satélites G10 e G12 apresentaram as melhores condições de observação, visto que os mesmos encontram-se com a trajetória a norte. Os satélites G25, G21 e G31 também apresentam uma trajetória de possível interesse, mas deve-se verificar qual o raio de abrangência da área de reflexão para que se descarte os dados advindos do solo.

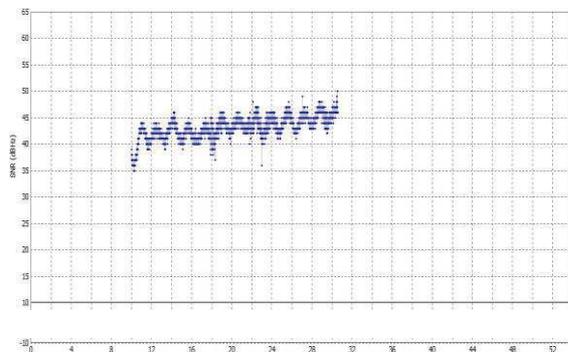
Figura 7 - Trajetória dos satélites rastreados



Fonte: Autores (2018)

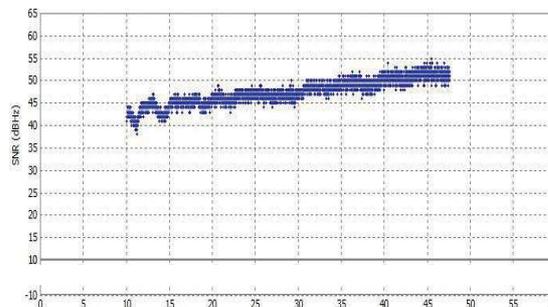
As Figuras 8 e 9 mostram os dados SNR brutos, sem nenhum tipo de refinamento, apenas separando os satélites que tiveram azimute dentro do desejado, tendo a expectativa de que o sinal refletido fosse da água.

Figura 8 - Representação do SNR em função da elevação - G10



Fonte: Autores (2018)

Figura 9 - Representação do SNR em função da elevação - G12



Fonte: Autores (2018)

Após a elaboração dos gráficos, que mostram a relação SNR de acordo com a elevação do satélite, parte-se para a estimação do nível da água. Os cálculos realizados correspondem aos satélites identificados como G10 e G12, ambos da constelação GPS e na banda L1. Estes apresentaram a trajetória dentro da região de interesse e um gráfico passível de análise sem filtros. Os resultados obtidos para os satélites G10 e G12 mostraram valores de distância vertical do GNSS em relação à água de 3,493 m e 3,726 m respectivamente. Em média, obteve-se para o desnível o valor de 3,609 m. Ao compararmos os resultados das duas metodologias envolvidas, a discrepância encontrada foi da ordem de 15,6 cm, o que equivale a cerca de 4% da altura média.

4 CONCLUSÕES

Foi possível avaliar de forma absoluta a técnica de refletometria GNSS (GNSS-R) na área de estudo comparando-a com o nivelamento geométrico, técnica consolidada. Para uma comparação preliminar, envolvendo apenas poucos satélites em poucas horas de observação, a diferença entre as duas técnicas foi de 15 cm ou 3% da altura média de 360 cm. É possível concluir que esta técnica apresenta resultados promissores para a aplicação a que se destinou neste artigo.

A água do Lago Guaíba estava calma e livre de grandes alterações no momento de medição do GNSS, o que pode se considerar um ambiente controlado. Em materiais científicos como (Liu et al., 2017) encontra-se algumas ressalvas em relação ao uso da técnica em ambientes mais perturbados, o que deve ser considerado para cálculos de nível do mar, onde as ondas são maiores. Nestes casos pode-se tornar necessário um maior refinamento dos dados e cálculos que considerem mais satélites, demonstrando o uso em outra condição de entorno.

Futuramente pretende-se automatizar a estimação refletométrica, feita aqui de forma visual/manual, além de processar dados de um período mais longo. Também almeja-se comparar os dados obtidos com um linígrafo por radar, presente próximo ao local de estacionamento do receptor geodésico, cujos dados foram solicitados à Prefeitura Municipal de Porto Alegre. Alternativamente, pretendemos repetir o nivelamento geométrico várias vezes ao longo da sessão, através de gravação de vídeo da régua parcialmente submersa e posterior leitura em escritório, a fim de cancelar a agitação aleatória das ondas no nível médio da água.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao acadêmico Maurício Kenji Yamawaki pelo auxílio no levantamento. Esse trabalho foi financiado em parte pelo CNPq (projeto 457530/2014-6 e) e Fapergs (26228.414.42497.26062017).

REFERÊNCIAS

BEVIS, Michael; SCHERER, Wolfgang; MERRIFIELD, Mark. Technical Issues and Recommendations Related to the Installation of Continuous GPS Stations at Tide Gauges. *Marine Geodesy*, [s. l.], v. 25, n. 1-2, p. 87-99, 2002.

CIPOLLINI, Paolo et al. Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges. *Surveys in Geophysics*, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 33-57, 2017.

Da Silva, L.M.; Freitas, S.R.C. **Análise das Mudanças Temporais no Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. Simpósio SIRGAS 2017 – SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA LAS AMÉRICAS. Mendoza, Argentina, 28 de novembro de 2017. Disponível em: <http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol22/22_DaSilva_DeFreitas_2017_Serie_Temporal_Imbituba.pdf> Acesso: 12 de março de 2018.

IBGE. **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos Geodésicos em território Brasileiro**. Resolução – PR n°22, de 21-07-1983. Disponível em: <<http://www.inde.gov.br/images/inde/bservico1602.pdf>> Acesso: 08 de março de 2018.

IBGE. **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia**. Disponível em: https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rmpg/default_rmpg_int.shtm?c=10. Acesso: 24 de maio de 2018.

FREITAS, S.R.C.; LUZ, R.T. (1995). **Altimetria de Precisão com GPS baseada no SGB: Possibilidades Físicas e Limitações**. In: 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, p. 135-138. Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=63286>

FREITAS, S.R.C.; MEDINA, A.S.; LIMA, S.R.S. (2002a). **Associated Problems to Link South American Vertical Networks and Possible Approaches to Face them**. In: IAG Symposia 124 – Vertical Reference Systems. Springer, Ed. H. Drewes et al., p. 318-323. Acesso em: 15 de abril de 2018

LARSON, Kristine M.; NIEVINSKI, Felipe G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 41–52, 2013

LIU, Wei et al. Coastal Sea-Level Measurements Based on GNSS-R Phase Altimetry: A Case Study at the Onsala Space Observatory, Sweden. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 55, n. 10, p. 5625–5636, 2017.

M. C. Makrakis; V. C. Cruz; F. G. Nievinski; S. F. Souza, **COMPARATIVO ENTRE RBMC E RMPG PARA O MONITORAMENTO DO NÍVEL DO MAR EM SALVADOR/BA – RESULTADOS PRELIMINARES DE REFLETOMETRIA GLONASS**, IV Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, p. 4, 24-jul-2017. Disponível em: <http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2017_IV_SBG/_artigos/2017_SBG_CTIG_paper_47.pdf> Acesso: 19 de abril de 2018.

NIEVINSKI, Felipe G.; LARSON, Kristine M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation—Part I: Formulation and Simulations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 6555–6563, 2014.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Alvaro et al. Levelling co-located GNSS and tide gauge stations using GNSS reflectometry. **Journal of Geodesy**, [s. l.], v. 89, n. 3, p. 241–258, 2015.

SILVA, M. F.; NIEVINSKI, F. G; MONICO, J. F. G. **Estações GNSS/maregráficas híbridas: Complementando a RMPG com a RBMC utilizando a técnica de reflectometria por multicaminho (avaliação inicial)** In: Anais XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia, 2014, Gramado, RS.

TAKASU, T. **RTKLIB ver. 2.4.2 Manual**. 2013. Disponível em: <http://www.rtklib.com/rtklib_document.htm> Acesso: 10 de janeiro de 2018