



## Panorama Geral das Técnicas de Observação do Nível do Mar para propósitos Geodésicos

### *Overview of Sea Level Observation Techniques for Geodetic purposes*

Samoel Giehl<sup>1</sup> e Regiane Dalazoana<sup>2</sup>

1 Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4971-4253>.

2 Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5468-0679>.

Recebido: 02.2021 | Aceito: 04.2022

**Resumo:** Classicamente, observações do nível do mar são realizadas por estações maregráficas instaladas, principalmente em regiões portuárias. No entanto, os dados maregráficos podem estar contaminados por movimentos verticais da crosta. A instalação de uma estação de monitoramento contínuo *Global Navigation Satellite System* (GNSS) nas proximidades das estações maregráficas permite quantificar esses movimentos. A partir da segunda metade da década de 1980, iniciou-se o lançamento de satélites exclusivamente para o monitoramento do nível do mar, os satélites altimétricos. Estes permitem a obtenção de observações em cobertura global e num sistema de referência geocêntrico, porém, apresentam problemas em regiões costeiras em função da interferência do terreno no sinal de retorno e da rugosidade da superfície do mar. Novas gerações de satélites baseadas na tecnologia de radar de abertura sintética permitem melhoria na qualidade das observações nestas regiões. A mais recente técnica utilizada para este tipo de monitoramento é conhecida como refletometria oceânica e seu princípio de funcionamento considera que os atrasos de tempo entre os sinais GNSS diretos e refletidos estão diretamente correlacionados com a diferença de altura entre o receptor e a superfície refletora. Embora estas técnicas observem o mesmo sinal oceânico, cada uma apresenta singularidades relativas ao sistema de referência, resolução temporal e espacial, entre outros. Deste modo, o presente trabalho visa apresentar as principais técnicas para monitoramento do nível do mar. Além disso, serão apresentados a duração das séries temporais e os principais bancos de dados referentes às observações maregráficas na costa brasileira e aos dados das diferentes missões altimétricas.

**Palavras-chave:** Estações Maregráficas. Altimetria por Satélite. Refletometria GNSS Oceânica.

**Abstract:** Classically, sea level observations were carried out by tide gauges stations installed mainly in port regions. However, tide gauge data can be contaminated by vertical crustal movements. The installation of a Global Navigation Satellite System (GNSS) continuous monitoring station in the vicinity of the tide gauge allows eliminating these movements. From the second half of the 1980s, the launch of satellites exclusively for monitoring sea level, the altimetry satellites, has begun. These allow obtaining observations in global coverage and in a geocentric reference system, however, it presents problems in coastal regions due to the interference of the terrain in the signal of return and the roughness of the sea surface. New generations of satellites based on synthetic aperture radar technology allow improvement in the quality in these regions. The most recent technique used for this type of monitoring is called ocean reflectometry and its operating principle considers that the time delay between direct and reflected GNSS signals is directly correlated with the height difference between the receiver and the reflector surface. Although these techniques observe the same oceanic signal, each one presents singularities related to the reference system, temporal and spatial resolution, among others. Thus, the present work aims to present the main techniques for sea level monitoring. In addition, the observation periods and the main databases referring to tide gauge observations along the Brazilian coast and referring to data from different altimetry missions will be presented.

**Keywords:** Tide gauge. Satellite altimetry. GNSS Oceanic Reflectometry.

## 1 INTRODUÇÃO

O objetivo fundamental da Geodésia é determinar a forma, a dimensão e o campo da gravidade externo da Terra bem como as suas variações temporais (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006; TORGE; MÜLLER, 2012). De acordo com Drewes (2006), a Geodésia configura-se como a ciência da medição e análise

dos fenômenos e efeitos relacionados aos processos físicos da Terra e, desta forma, contribui de forma significativa para os estudos relacionados a uma série de processos geodinâmicos e às mudanças climáticas globais. Dentro destas perspectivas, o monitoramento do nível do mar tornou-se uma prática relevante, uma vez que, por exemplo, a sua elevação progressiva pode ocasionar, no futuro, inundações de zonas costeiras. Segundo Nicholls e Cazenave (2010), a tendência média de aumento do nível do mar global entre 1993 e 2009, foi de  $3,3 \pm 0,4$ mm/ano, sendo que as principais causas deste evento são a expansão térmica da água do mar e a entrada de água proveniente de degelo e de reservatórios do continente.

Há quase dois séculos as estações maregráficas têm sido os instrumentos mais confiáveis para as observações do nível do mar (BARNETT, 1984). Porém, o desenvolvimento tecnológico e o advento da era espacial proporcionaram novas tecnologias que possibilitam a obtenção desse tipo de observação, como é o caso dos satélites altímetros, do uso de boias equipadas com sensores inerciais e Sistema Global de Navegação por Satélites (*Global Navigation Satellite System* - GNSS) e da refletometria GNSS, por exemplo.

Sob um ponto de vista clássico, longas séries temporais de observações maregráficas definiam o Nível Médio do Mar (NMM) considerado coincidente a uma superfície equipotencial do campo de gravidade da Terra (ou geóide) e serviam como base para a definição clássica de *Datum* Vertical. Assim, os sistemas de altitudes existentes na maioria dos países referem-se ao NMM local determinado por observações maregráficas e são realizados por redes de nivelamento onde aplicou-se ou não, dependendo do país, correções gravimétricas (teóricas ou baseadas em observações) aos desníveis observados com o objetivo de atribuir algum significado físico às altitudes. No Brasil, a implantação da Rede Vertical Brasileira iniciou-se em 1945 por meio de nivelamento geométrico, onde inicialmente, as estações possuíam altitudes referidas ao *Datum* Vertical de Torres (RS) e posteriormente, em 1958, foi adotado oficialmente o *Datum* Vertical de Imbituba (SC) que para sua realização contava com nove anos de observações maregráficas (1949-1957). Cabe ainda destacar a parte da rede vertical localizada no Amapá e que está vinculada ao *Datum* de Santana (DALAZOANA, 2006; LUZ, 2008).

Neste contexto e sob uma perspectiva moderna, os esforços atuais da Geodésia se concentram na realização de um sistema global de altitudes unificado que suporte altitudes com significado físico, vinculadas a uma superfície equipotencial do campo da gravidade da Terra (superfície de referência), com precisão centimétrica e incluindo a determinação da variação temporal das coordenadas verticais. Este sistema global de altitudes foi estabelecido pela Resolução nº 1 de julho de 2015 da Associação Internacional de Geodésia (*International Association of Geodesy* - IAG), a qual define o *International Height Reference System* (IHRs) e sua realização, o *International Height Reference Frame* (IHRF) (GGOS, 2021). O IHRF está em processo de implantação e as estações maregráficas são parte fundamental de sua configuração visando à unificação dos diferentes *Data* verticais ao IHRF. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de determinar estratégias que possibilitem a conexão das redes verticais clássicas a esta superfície de referência, eliminando assim as discrepâncias existentes entre os diferentes referenciais verticais (SANTACRUZ; DE FREITAS, 2021; RIBEIRO, 2019; SÁNCHEZ; FREITAS; BARZAGHI, 2018; MONTECINO, 2018).

Os estudos relacionados com a modelagem do campo de gravidade da Terra e com a dinâmica dos oceanos foram impulsionados com o desenvolvimento da altimetria por satélites, técnica que se mostrou eficiente também no monitoramento de rios, lagos e gelo, por exemplo (ESCUDIER et al., 2017).

A altimetria por satélites foi utilizada pela primeira vez durante as missões SKYLAB, entre os anos de 1973 e 1974 (SEEBER, 2003). A partir daí, novas e melhoradas versões de altímetros foram lançadas, como os satélites GEOS-3 (1975), SEASAT-1 (1978), GEOSAT (1985), ERS-1 (1991), ERS-2 (1995), T/P (1992), os da série Jason (Jason-1 em 2001, Jason-2 em 2008 e Jason-3 em 2016), CryoSat-2 (2010), SARAL (2013), entre outros. Por meio destes satélites, foi e continua sendo possível a obtenção de observações do nível do mar em uma escala global e num sistema de referência geocêntrico.

A técnica mais recente para o monitoramento do nível do mar, proposta por Martin-Neira et al. (1993), consiste na determinação do nível do mar pela combinação de sinais GNSS, diretos e refletidos na superfície da Terra, que chegam na antena receptora geodésica. Esse método foi chamado de *Passive Reflectometry and Interferometric System* (PARIS), no entanto, atualmente é mais comum à denominação Refletometria GNSS (*GNSS reflectometry* - GNSS-R). Uma das principais vantagens desse método é a possibilidade de discriminar

movimentos verticais locais da crosta de observações do nível do mar, uma vez que o sistema geodésico de referência envolvido é geocêntrico.

Tendo em vista a importância do monitoramento do nível do mar para as mais diversas finalidades, o presente trabalho objetiva descrever o histórico, o princípio de funcionamento e as perspectivas futuras das principais técnicas de observação relacionadas a este tópico empregadas pela Geodésia: observações maregráficas, de altimetria por satélite e refletometria GNSS. Também serão abordados a disponibilidade e duração das séries temporais de dados e os principais bancos de dados referentes às observações maregráficas na costa brasileira e aos dados das diferentes missões altimétricas.

## 2 HISTÓRICO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES MAREGRÁFICOS

Os antigos egípcios previam o início das inundações do Rio Nilo por meio de nilômetros que eram marcas na margem do rio, escadas ou pilares, ligados aos templos (PUGH; WOODWORTH, 2014), conforme apresentado na Figura 1a. O princípio de funcionamento dos nilômetros é similar ao das réguas de marés encontradas com frequência em portos. Basicamente, a leitura do nível instantâneo do mar é verificada diretamente na graduação da régua, como pode ser visto na Figura 1b.

Figura 1 - Nilômetro na Ilha de Roda em Cairo no Egito [a] e régua de maré no Porto Imbituba [b].



Fonte: Flickr (2020) [Figura 1a]; e Dalazoana (2006) [Figura 1b].

Segundo Pugh e Woodworth (2014), as leituras nas réguas de marés possuem uma precisão de dois cm em condições de águas calmas e na presença de ondas a precisão se deteriora. Além disso, erros sistemáticos podem estar presentes devido ao viés do leitor. Desse modo, as réguas de marés se tornam inadequadas como instrumento principal de monitoramento do nível do mar com finalidades geodésicas. No entanto, as réguas de marés são fundamentais para verificar possíveis erros sistemáticos em sensores maregráficos por meio do Teste Van de Castele, visto que elas permitem a observação do nível instantâneo do mar sem necessidade de uma fonte de energia, sistema de registro e mecanismos de filtragem (IBGE, 2010).

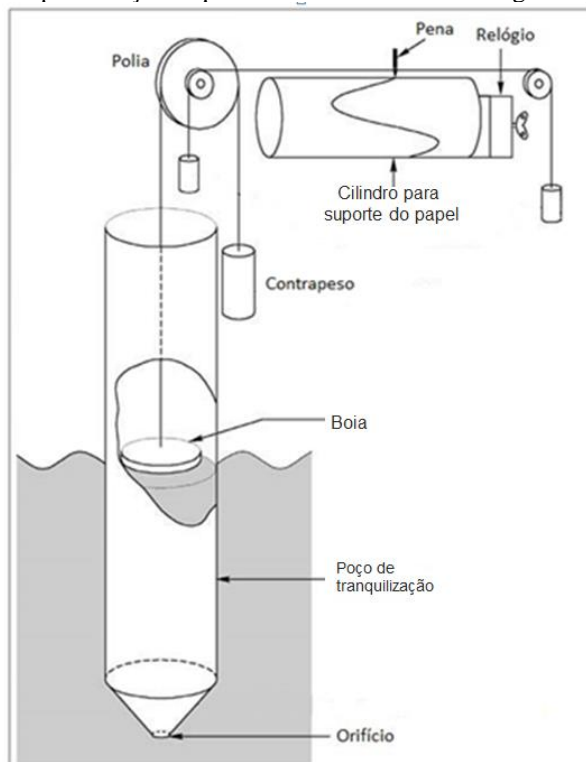
Em 1665, Robert Moray descreveu um dispositivo para medição do nível da água denominado *stilling-well* (poço de tranquilização), o qual consistia de um tubo vertical com um pequeno orifício aberto no fundo por onde ocorre a entrada e saída da água do mar (MORAY, 1665). A água dentro do tubo permite uma observação mais precisa do nível do mar, pois, nestas condições, as altas frequências são atenuadas. Embora o dispositivo citado não tenha sido construído por Moray, sua idealização foi empregada mais tarde e até hoje é amplamente utilizada em estações maregráficas (CARTWRIGHT, 1999).

Um dos primeiros equipamentos com registrador automático do nível do mar foi construído, em 1831, pelo Engenheiro Civil Henry Robinson Palmer. Palmer desejava obter uma série de observações precisas durante todas as mudanças das marés no estuário do Tâmesa em Sheerness (Inglaterra) e, para isso construiu

um equipamento que registrava a subida e a descida do nível da água a partir dos movimentos verticais de uma boia flutuante no poço de tranquilização. A boia era conectada a uma pena que gravava os movimentos da água em um papel (maregrama) enrolado a um cilindro de latão programado para realizar uma rotação em seis horas (PALMER, 1831).

O equipamento construído por Palmer pode ser denominado sensor maregráfico mecânico, de acordo com a nomenclatura apresentada em IBGE (2010), com registro gráfico devido ao fato dos dados serem gravados em um maregrama por meio de uma pena. A Figura 2 apresenta a representação esquemática de um sensor maregráfico mecânico.

Figura 2 - Representação esquemática de um sensor maregráfico mecânico.



Fonte: Adaptada de IOC (2006).

Este tipo de sensor maregráfico, de acordo com IOC (2006) é, provavelmente, o sistema de registro do nível do mar mais comum em todo o mundo. Porém, ao longo do tempo, foram implementadas outras tecnologias para registro do nível do mar, como sensores de pressão, acústicos e radar. Estes sensores, denominados sensores eletrônicos, ao contrário da régua maregráfica, não observam de forma direta o nível do mar, mas sim, outros parâmetros físicos tais como: pressão da coluna de água sobre o sensor e tempo de deslocamento de uma onda sonora ou eletromagnética entre o sensor e a superfície da água. Estes parâmetros físicos são então convertidos em informações de nível do mar (IBGE, 2010).

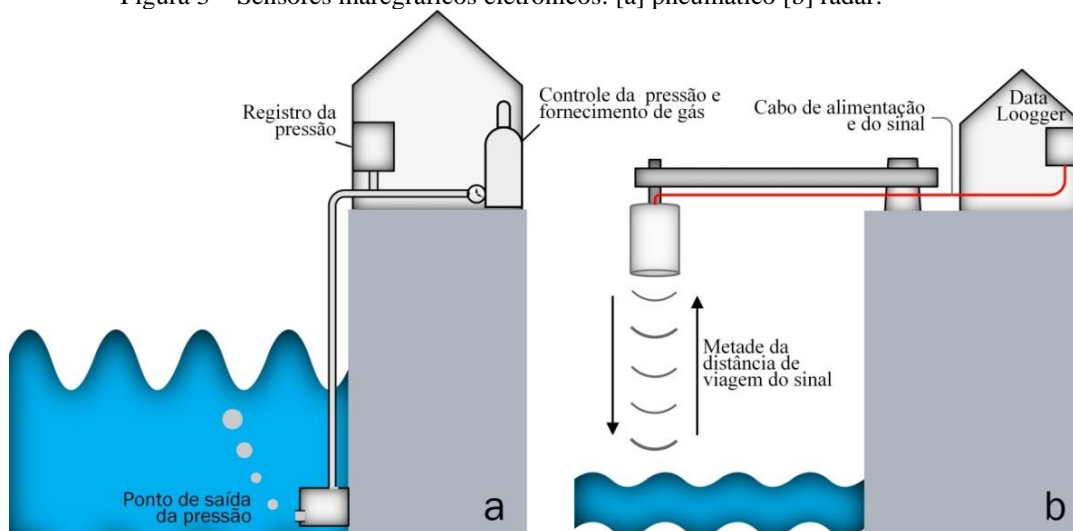
O princípio de funcionamento do marégrafo de pressão consiste em medir a variação de pressão em um ponto fixo, localizado abaixo da superfície do mar e com base em relações de hidrostática básica, que levam em conta a densidade da água do mar e o valor da aceleração da gravidade, determinar o valor de nível d'água. A pressão aumenta de forma diretamente proporcional à medida que o nível d'água aumenta (PUGH; WOODWORTH, 2014). Segundo IOC (2006) e Pugh e Woodworth (2014), os marégrafos de pressão mais comuns são os com sensor pneumático e com sensor eletrônico. O marégrafo com sensor eletrônico mede o "peso" da coluna d'água acima do medidor por meio da variação do valor do parâmetro ou propriedade elétrica, enquanto que no marégrafo com sensor pneumático, o ar comprimido ou o gás nitrogênio é fornecido por um cilindro e conduzido ao longo de um tubo até um ponto abaixo do nível do mar onde há um pequeno orifício pelo qual o ar escapa em forma de bolhas e volta à superfície. Assim sendo, a pressão do ar dentro da tubulação será igual à pressão da coluna de água acima do orifício somada à pressão atmosférica, o que permitirá determinar, por meio de relações de hidrostática básica, a altura do nível do mar acima do orifício, conforme

apresentado na Figura 3a. Os mareógrafos de pressão têm a desvantagem de apresentar uma deriva da ordem de 1 mm por ano e a dificuldade de estabelecer um Datum quando se emprega um único sensor de pressão (IOC, 2006). Para evitar o problema da deriva, os fabricantes recomendam que os sensores sejam recalibrados a cada seis meses (MÍGUEZ; TESTUT; WÖPPELMANN, 2012). De acordo com Woodworth et. al (1996) e IOC (1994) um sensor de pressão adicional próximo ao nível médio do mar permite o controle do Datum e da deriva instrumental com precisão milimétrica.

O princípio de funcionamento dos sensores acústicos baseia-se na determinação do tempo de viagem de pulsos acústicos emitidos pelo sensor no sentido nadiral e refletidos pela superfície do mar. Este tipo de observação é realizado com o sensor acima do nível d'água, podendo estar localizado a céu aberto ou dentro de um tubo, cuja função é garantir uma maior estabilização da superfície d'água. A velocidade do som no ar varia significativamente com a temperatura e umidade e, portanto, é necessário realizar correções aos valores observados (IOC, 2006).

Por fim, o princípio de funcionamento dos sensores radar também consiste na determinação do tempo de viagem de ida e volta de um sinal, tal como ocorre nos sistemas acústicos, entretanto, neste caso o sinal emitido é de radiação eletromagnética (PUGH; WOODWORTH, 2014). A Figura 3b apresenta a representação esquemática do sensor radar. Atualmente, este tipo de sensor é bastante utilizado devido ao baixo custo, à facilidade de instalação e manutenção e, principalmente, por suas observações não serem altamente dependentes da temperatura do ar como é o caso das observações provenientes dos sensores acústicos (IOC, 2006).

Figura 3 – Sensores mareográficos eletrônicos: [a] pneumático [b] radar.



Fonte: Adaptada de Pugh e Woodworth (2014) [Figura 3a]; IOC (2006) [Figura 3b].

## 2.1 OBSERVAÇÕES MAREGRÁFICAS: INSTITUIÇÕES E PROJETOS DE DESTAQUE E CONTEXTUALIZAÇÃO NO BRASIL

No Brasil, um importante marco inicial em termos de empregabilidade dos dados mareográficos para fins geodésicos, foi o estabelecimento provisório do *Datum* Vertical de Torres no Rio Grande do Sul, definido com base em um ano de observações (1919-1920) do nível do mar. O propósito do estabelecimento deste *Datum* de caráter provisório, segundo Alencar (1990), era determinar a componente altimétrica da Cadeia de Triangulação de primeira ordem e, assim, fornecer as coordenadas dos pontos de apoio básico necessários ao mapeamento da Zona Carbonífera de Santa Catarina. Em 1958, o *Datum* Vertical de Imbituba (DVI), localizado no porto de Imbituba em Santa Catarina, foi oficialmente adotado no país em substituição ao *Datum* de Torres, pois, contava com nove anos de observações mareográficas (1949-1957). Na maior parte do território brasileiro, o DVI ainda é a referência para as altitudes da rede vertical do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

A Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG) foi proposta ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 1996, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e a Universidade

Federal do Paraná (UFPR) (LUZ; NEVES; FREITAS, 1996 apud IBGE, 2016) e já no ano seguinte foi lançada com o objetivo de realizar a transição para o *Datum* Vertical do Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS) e a correlação entre o DVI e outros referenciais altimétricos existentes ao longo do litoral brasileiro (LUZ; FREITAS; DALAZOANA, 2002 apud IBGE, 2016). Em 2001 foram estabelecidas as primeiras estações da RMPG pelo IBGE e em 2008 a sua capacidade operacional plena foi alcançada quando as estações de Santana, Fortaleza, Salvador, Macaé e Imbituba passaram a contar com sensores maregráficos eletrônicos e convencionais (IBGE, 2010). Atualmente, a RMPG conta com seis estações maregráficas ativas (Imbituba, Salvador, Santana, Fortaleza, Arraial do Cabo e Belém) e uma estação inativa (Macaé) desde junho de 2015. Estas estações são compostas por, no mínimo, dois sistemas independentes de observação do nível do mar, sendo um mecânico e outro eletrônico, com a finalidade de evitar a perda de dados em função de problemas operacionais no mareógrafo eletrônico (IBGE, 2019). Além disso, algumas estações contam com régua maregráfica, sensores meteorológicos e uma estação GNSS da RBMC (IBGE, 2016).

A RMPG incorpora o Controle Geodésico de Estações Maregráficas (CGEM) como parte fundamental de sua operação, dado que o monitoramento GNSS contínuo da posição tridimensional dos sensores maregráficos permite detectar e quantificar movimentos verticais de origem não oceânica e, posteriormente, corrigir as observações maregráficas (IBGE, 2010). Além disso, o CGEM também permite referenciar o nível do mar observado pelos sensores maregráficos a um Sistema Geodésico de Referência (SGR) geocêntrico e, conseqüentemente, permite a integração de observações maregráficas com observações provenientes da Altimetria por Satélites (DALAZOANA, 2006). No Brasil, foram instaladas estações de monitoramento contínuo da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) nas proximidades das estações maregráficas da RMPG.

As observações maregráficas da RMPG foram empregadas para a determinação dos Níveis de Redução que consistem de uma referência vertical adotada pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) para a confecção das cartas náuticas (SANTANA; DALAZOANA, 2020).

O *Global Sea Level Observing System* (GLOSS) foi estabelecido pela *Intergovernmental Oceanographic Commission* (COI) em 1985 com o propósito de fornecer uma supervisão e coordenação de redes regionais e globais de estações maregráficas que visam contribuir com a compreensão da variabilidade do nível do mar em um longo período de tempo e de diversas escalas espaciais. Além disso, o GLOSS contribui com o *Global Ocean Observing System* (GOOS) através desenvolvimento da rede de medição do nível do mar, sistemas de troca e coleta de dados e preparação de produtos do nível do mar para vários grupos de usuários (GLOSS, 2012).

Os principais bancos de dados que armazenam e disponibilizam observações maregráficas de estações espalhadas por todo o globo, incluindo as estações ao longo da costa brasileira, são o Serviço Permanente para o Nível Médio do Mar (*Permanent Service for Mean Sea Level* - PSMSL) e o Centro de estudos do Nível do Mar da Universidade do Haváí (*University of Hawaii Sea Level Center* - UHSLC). No Brasil, o próprio IBGE, responsável pelo estabelecimento e manutenção da RMPG.

Segundo CHM (2021), o PSMSL e o UHSLC armazenam observações das estações maregráficas da Rede Básica GLOSS. São instituições participantes do programa GLOSS-Brasil: DHN, IBGE, Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IOUSP), Centro de Estudos do Mar da Universidade Federal do Paraná (CEM), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Coordenação de Programas de Pós Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Gerência Geral do Porto de Ponta da Madeira (VALE), Terminal Especializado de Barra do Riacho (PORTOCEL), Instituto de Pesquisas Hidroviárias (INPH), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal do Pará (UFPA) e Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

Estabelecido em 1933, o PSMSL foi responsável pela coleta, publicação, análise e interpretação dos dados do nível do mar da rede global de estações maregráficas. O banco de dados do PSMSL armazena médias mensais e anuais de dados maregráficos para propósitos científicos de investigação das mudanças do nível do mar. Desse modo, para evitar valores negativos, os dados são reduzidos a uma referência em comum, denominada *Revised Local Reference* (RLR), que corresponde a aproximadamente 7000 mm abaixo do NMM. No entanto, nem todos os dados foram reduzidos ao RLR em função da quantidade de saltos (*outliers*), o que

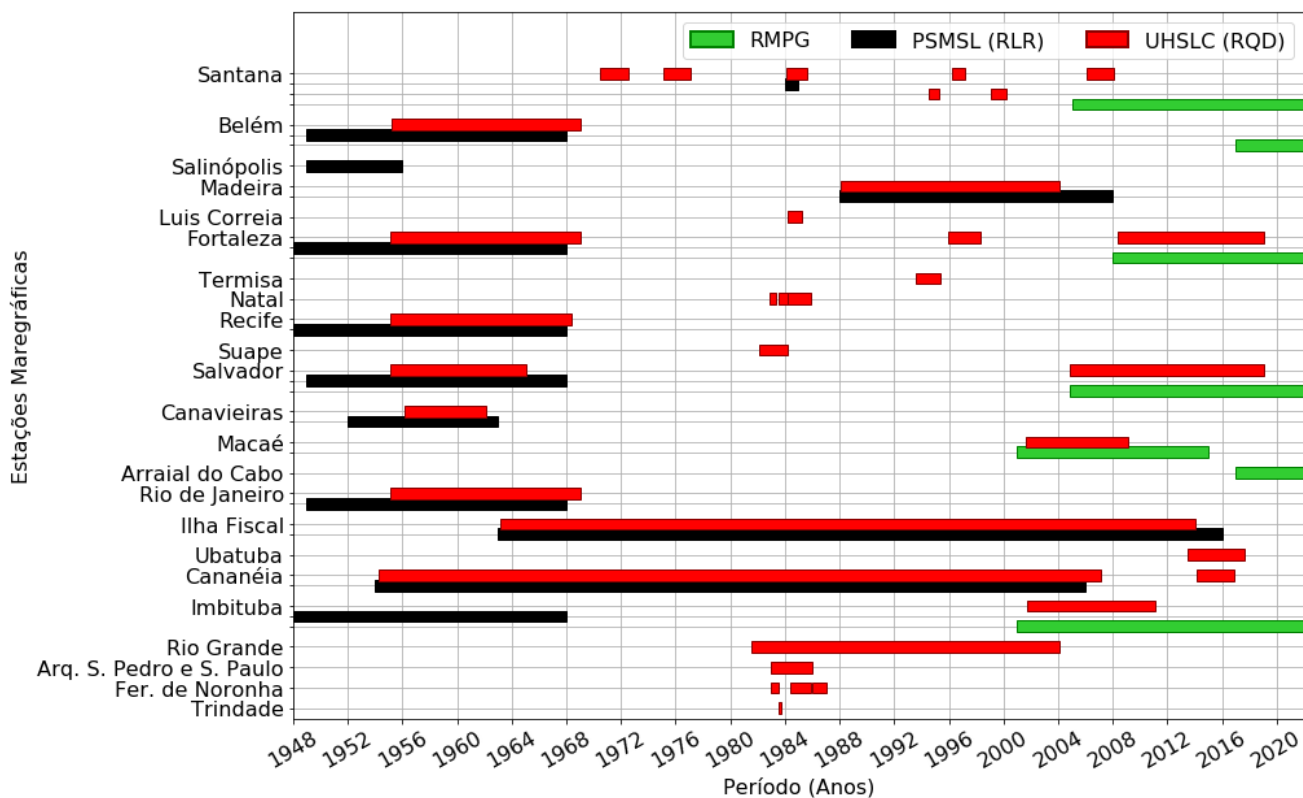
os tornam inadequados para uso com fins científicos, como por exemplo, as observações providas das estações maregráficas do Porto de Rio Grande e de Fernando de Noronha (PSMSL, 2019).

Segundo Luz (2008), a partir de 1969, a operação da estação maregráfica de Imbituba que era de responsabilidade do *Inter American Geodetic Survey* (IAGS), passou a cargo das autoridades portuárias brasileiras, e, apesar do PSMSL não ter esses dados, os documentos da antiga Portobrás comprovam que as observações existem. O IBGE obteve somente a cópia dos dados originais (maregramas) coletados entre 1986 e 1992 da Companhia Docas de Imbituba.

O banco de dados do UHSLC armazena observações maregráficas horárias e diárias com dois níveis de controle de qualidade: *Fast Delivery* (FD), onde os dados são disponibilizados no prazo de um a dois meses após a coleta e recebem um controle básico de qualidade, como a remoção de *outliers*; e *Research Quality Data* (RQD), onde os dados são disponibilizados no prazo de um a dois anos após a coleta, recebem um controle completo de qualidade e são destinados para fins científicos (UHSLC, 2019).

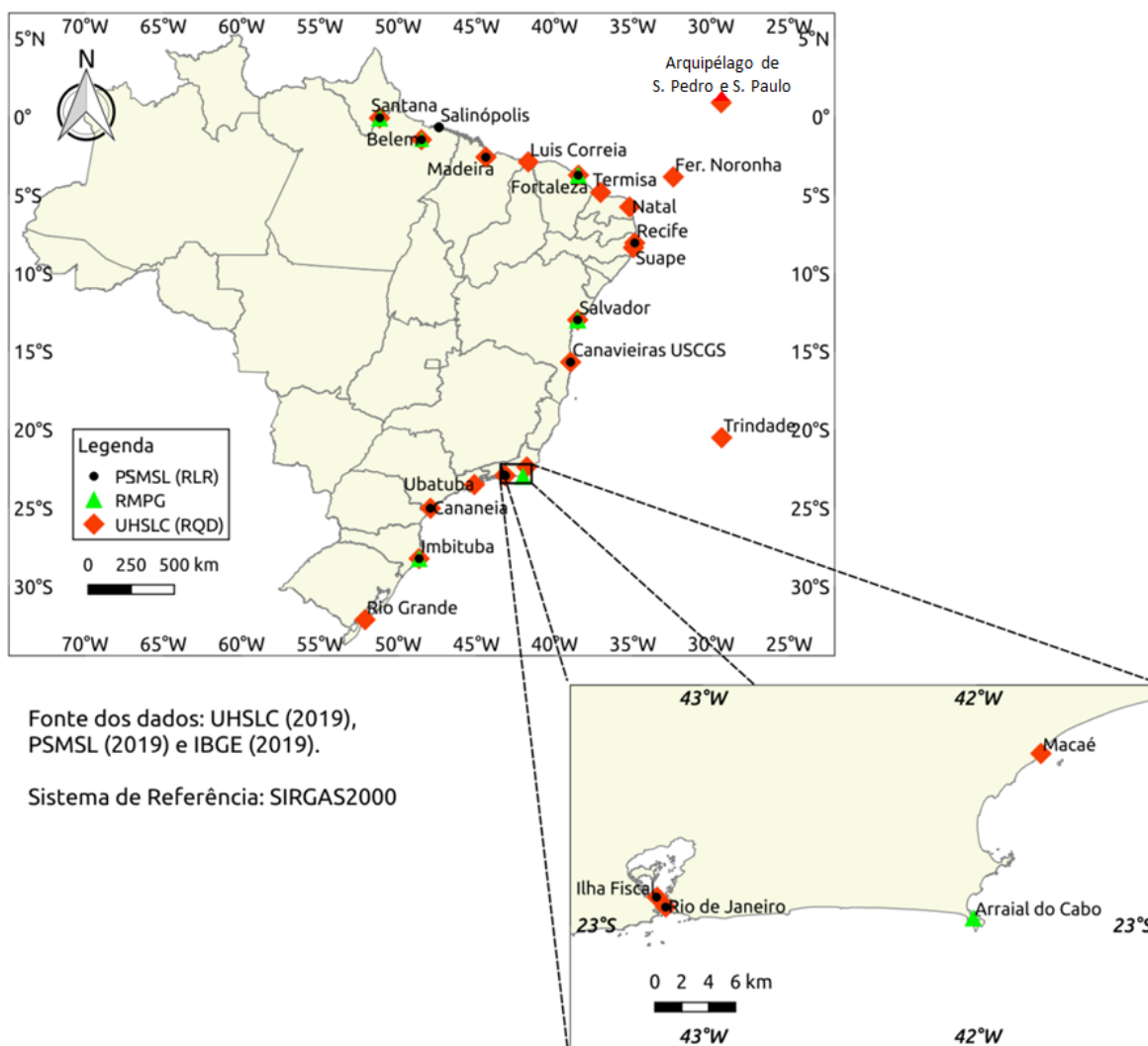
A Figura 4 apresenta os períodos para os quais existem dados das estações maregráficas instaladas ao longo da costa do Brasil com dados disponíveis na RMPG (em vermelho), no PSMSL (RLR) (em azul) e na UHSLC (RQD) (em laranja) e a Figura 5 ilustra a localização destas estações.

Figura 4 – Período de informação maregráfica da RMPG, PSMSL (RLR) E UHSLC (RQD).



Elaboração: Os autores (2021).

Figura 5 - Localização das estações maregráficas instaladas ao longo da costa do Brasil com dados disponíveis na RMPG, no PSMSL (RLR) e na UHSLC (RQD).



Elaboração: Os autores (2020).

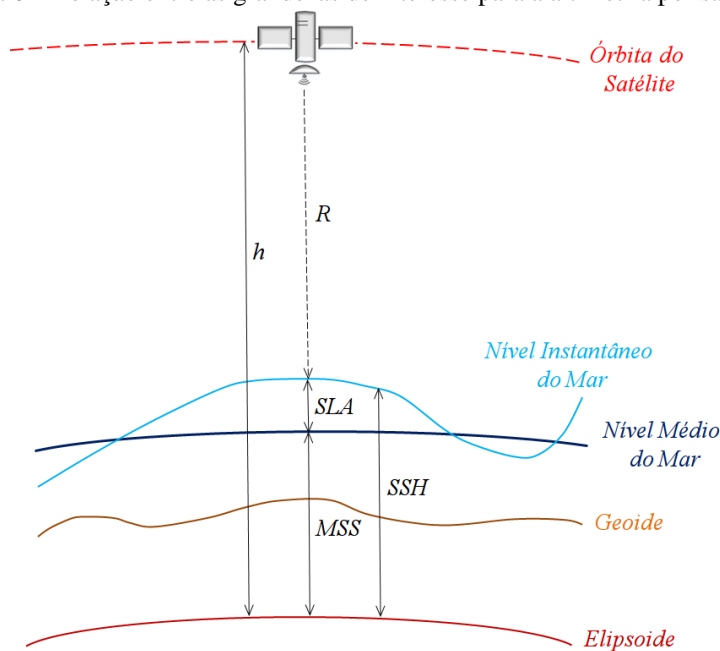
### 3 ASPECTOS GERAIS DA ALTIMETRIA POR SATÉLITE

A altimetria por satélite fornece as observações instantâneas da superfície do mar, gelo ou grandes corpos d'água com relação a um referencial geocêntrico (vinculado a um elipsoide de referência global), com uma precisão da ordem de alguns centímetros (PLAG; PEARLMAN, 2009).

Os produtos provenientes da altimetria por satélites empregados para o monitoramento do nível do mar são denominados altitude da superfície do mar (*Sea Surface Height – SSH*) e anomalia do nível do mar (*Sea Level Anomalies - SLA*). Define-se SSH como a diferença entre a altitude do satélite em relação a um elipsoide de referência ( $h$ ) e a altura do satélite em relação à superfície instantânea dos oceanos ( $R$ ) (ESCUDIER et al., 2017). O NMM é definido como uma superfície estacionária do mar que não muda com o tempo (LU; QU; QIAO, 2014). De acordo com Escudier et al. (2017), a diferença entre o NMM e a SSH resulta na SLA. A Figura 6 apresenta estas grandezas de interesse para a altimetria por satélite.



Figura 6 – Relação entre as grandezas de interesse para a altimetria por satélite.



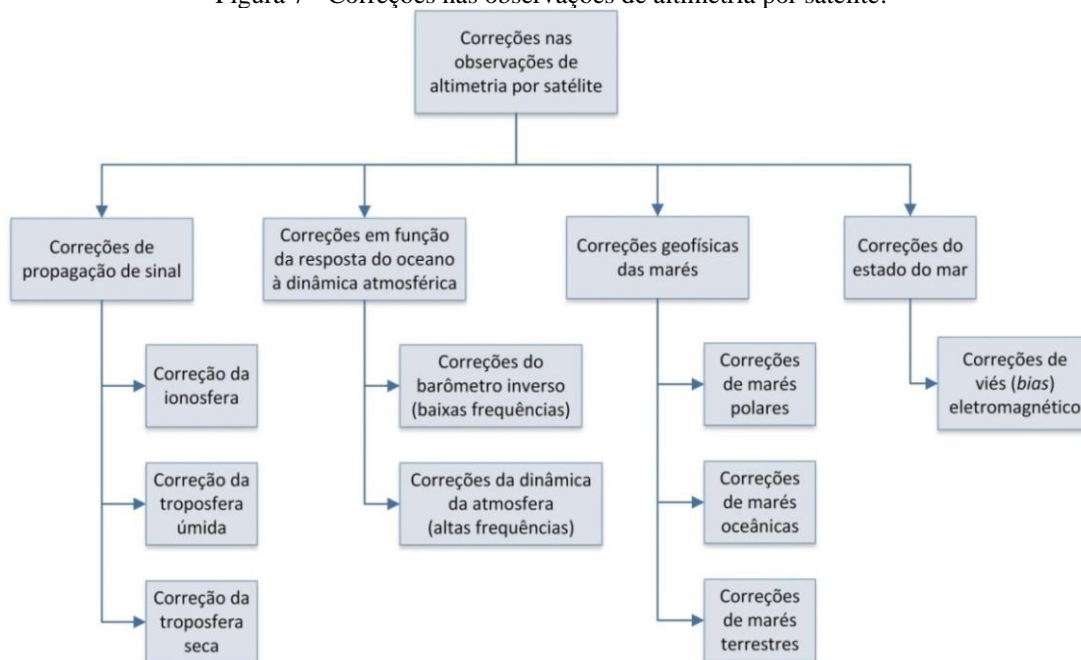
Fonte: Adaptada de Lu, Qu e Qiao (2014).

Conforme abordado em Chelton et al. (2001) e Seeber (2003), o princípio básico de funcionamento dos satélites altimétricos consiste na transmissão de um pulso de radiação eletromagnética (micro-ondas por exemplo), em direção nadiral até a superfície do mar. Este pulso interage com a superfície do mar e reflete de volta ao receptor do altímetro. O tempo de percurso ( $t$ ) entre a transmissão e a recepção do sinal multiplicado pela velocidade de propagação da luz no vácuo ( $c$ ) permite determinar a distância ( $range - R$ ) entre o satélite e a superfície do mar, conforme apresentado na equação (1):

$$R = \frac{ct}{2} - \sum_j \Delta R_j \tag{1}$$

onde o termo  $\Delta R_j$ :  $j = 1, 2, \dots$  corresponde a um conjunto de correções conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Correções nas observações de altimetria por satélite.



Fonte: Adaptada de Nerem et al. (2017).

Este conjunto de correções envolve: correções de propagação de sinal, uma vez que a propagação do pulso é afetada pela presença de vapor d'água, gases secos e elétrons livres na atmosfera que reduzem a velocidade de propagação do pulso de radar em relação ao espaço livre e, portanto, tendem a superestimar a distância medida; correções em função da resposta do oceano à dinâmica atmosférica uma vez que a superfície do mar atua como uma membrana sensível às variações de pressão atmosférica; correções de marés de forma a evitar que as variações produzidas pelas marés afetem as análises relacionadas com a variação temporal do nível do mar; e correções do estado do mar que levam em consideração, por exemplo, a diferença entre a parcela da superfície que reflete o sinal emitido pelo satélite e a superfície média na região onde o feixe incide dada a característica ondulada da superfície oceânica. Detalhes a respeito das correções podem ser encontrados em Escudier et al. (2017), Andersen e Scharroo (2011) e Chelton et al. (2001).

A aplicação destas correções aos dados de altimetria por satélite, bem como o cálculo preciso da órbita dos satélites permite alcançar um valor de *Root-Mean-Square Error* (RMSE) de aproximadamente 1 a 2 cm para uma única observação de SSH (PLAG; PEARLMAN, 2009). Nesse sentido, Ablain et al. (2009), ressaltam que diferentes autores constataram discrepâncias nas estimativas do aumento do NMM global acima de 0,7 mm/ano que se devem, principalmente, à metodologia de processamento dos dados e às correções geofísicas aplicadas aos dados.

O sinal que chega até a superfície do mar é parcialmente absorvido pela água e parcialmente disperso para diversas direções. A refletividade da água é alta na faixa de frequência de micro-ondas entre 2 e 18 GHz e, por isso, essas faixas são as mais adequadas para a altimetria por satélite. Além da determinação do valor de *R*, as características dos sinais refletidos pela superfície do oceano contêm informações sobre a rugosidade, a altura das ondas e a velocidade do vento sobre a superfície oceânica (BENVENISTE, 2011).

Segundo Brenner, Koblinsky e Beckley (1990), a determinação das variações locais do nível do mar requer que os satélites altimétricos sejam mantidos em uma órbita repetida. No entanto, diversas perturbações, como por exemplo, o arrasto atmosférico e a pressão da radiação solar, fazem com que haja desvios na órbita. Para o GEOSAT, por exemplo, esse desvio fez com que a trilha (projeção da órbita do satélite na superfície da Terra) variasse  $\pm 1$  km em relação à trilha nominal.

A posição do satélite fornece a referência para as observações da altimetria por satélite e por isso a determinação precisa da órbita (*Precise Orbit Determination* – POD) é fundamental para garantir um produto altimétrico final de qualidade geodésica. De acordo com Dalazoana (2006), a determinação da órbita dos satélites altimétricos consiste na determinação da posição tridimensional do centro de massa do satélite a intervalos regulares de tempo, com relação a um elipsoide de referência. Diferentes sistemas de rastreamento são empregados para a POD: *Satellite Laser Ranging* (SLR), Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS), *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite* (DORIS), entre outros (CHELTON et al., 2001).

Além dos radares altimétricos abordados anteriormente, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) lançou em 2003 a missão *Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite* (ICESat) que pela primeira vez transportou um altímetro a laser em órbita polar, chamado *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS) (SCHUTZ et al., 2005). Ainda segundo a referência anterior, embora os objetivos principais se concentrem no balanço de massa da calota de gelo polar, as observações do GLAS têm aplicações interdisciplinares, como por exemplo, para a topografia do solo e hidrologia. O diâmetro do campo de visão ou pegada (*footprint*) do altímetro e o espaçamento entre as observações ao longo da trilha do altímetro a laser (70 m e 200 m, respectivamente) são, significativamente, menores do que o altímetro a radar (10 km e 7 km, respectivamente) e, portanto, o altímetro a laser pode detectar mudanças acentuadas na elevação da superfície com maior precisão do que um radar (CHAMBERS, 2015). Devido a estas características, o altímetro a laser mede a superfície das ondas do oceano e não a superfície média como um altímetro de radar. Segundo Zwally et al. (2002), é improvável que a altimetria a laser substitua a altimetria de radar em observações temporais do nível do mar, no entanto, a altimetria a laser permite uma resolução maior do MSS em relação ao radar altímetro. No caso do altímetro a radar, a distância entre o altímetro e o nível do mar é determinada com base na média de todas as elevações elementares dentro do campo de visão abrangido pela largura do feixe de micro-ondas incidente sobre a superfície do mar (CHELTON et al., 2001).

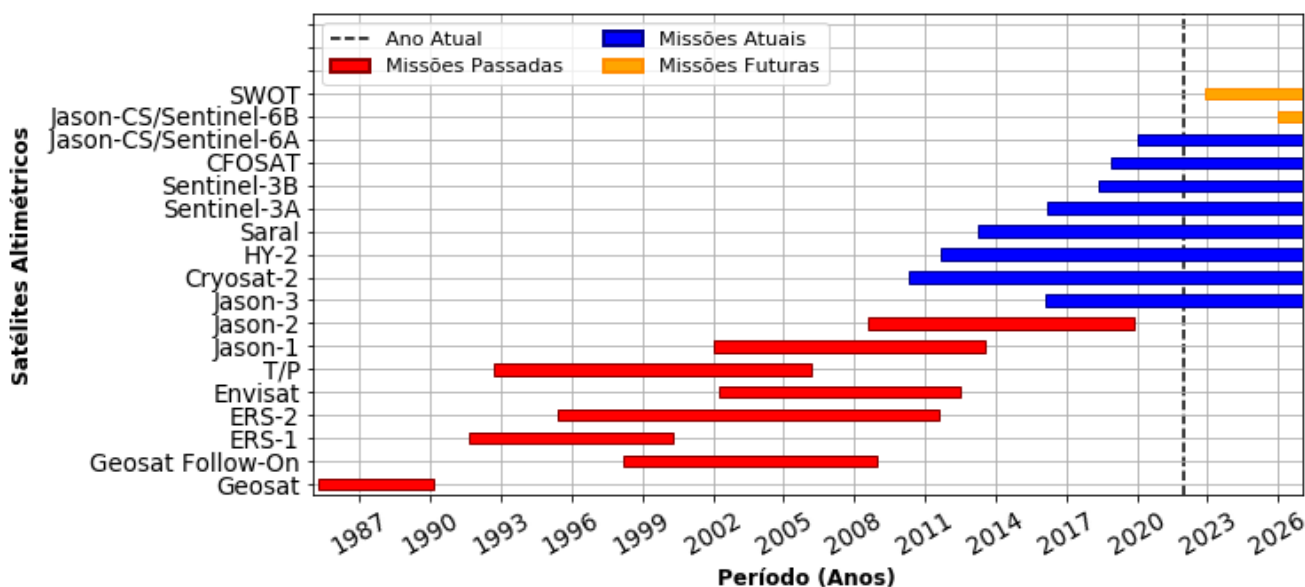
O acesso às séries temporais de valores de SSH e SLA é livre para fins científicos, e se dá por meio de bancos de dados como os do: *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI)*; *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO)*; *European Space Agency (ESA)*; *Physical Oceanography Distributed Active Archiving Center (PODAAC)*; *Indian Space Research Organization (ISRO)*; e *Radar Altimeter Database System (RADS)*.

No Brasil, os estudos relacionados à altimetria por satélite para fins geodésicos se concentraram inicialmente no propósito de analisar a evolução temporal do *Datum Vertical Brasileiro* de Imbituba-SC, citam-se como exemplos os estudos de Dalazoana (2006) e Da Silva (2017); e na modernização da componente vertical do Sistema Geodésico Brasileiro com o trabalho de Luz (2008). Outro exemplo de estudo relacionado ao nível do mar com uso de dados da altimetria por satélites, com a participação de pesquisadores brasileiros, é o apresentado por Montecino, et al., (2017) na costa do Chile. Recentemente, Menezes et al. (2021), publicaram um trabalho que utilizou os dados da missão CryoSat-2 para a obtenção do NMM na estação maregráfica de Fortaleza-CE (EMFOR) com o objetivo de obter informações sobre o comportamento do nível do mar, como subsídio ao planejamento de uso e gestão da zona costeira.

### 3.1 Evolução das Missões de Altimetria por Satélite

O potencial da altimetria por satélite foi reconhecido durante o Congresso de *Williamstown* em 1969 e já durante a década de 1970 foi lançada a missão *Sky Laboratory (SkyLab, 1973 - 1974)* que forneceu as primeiras medições das ondulações do geóide marinho (ESCUDIER et al., 2017; AVISO, 2022; KAULA et al., 1970). Posteriormente, foi lançada a missão *Geodynamic Experimental Ocean Satellite (GEOS-3, 1975 - 1979)*, que forneceu observações altimétricas mais precisas devido às melhorias na determinação da órbita do satélite por meio de um conjunto de refletores a laser a bordo do satélite. A missão *SEAFaring SATellite (SEASAT, Junho de 1978 - Outubro de 1978)*, evidenciou a capacidade da altimetria por satélite de monitorar os oceanos em mesoescala e foi a primeira missão que possibilitou a livre distribuição dos dados aos cientistas de todo o mundo. A missão *GEODETIC SATellite (GEOSAT, 1985 - 1995)*, objetivou modelar o geóide marinho para a Marinha dos EUA a partir de dados de alta qualidade a longo prazo (ESCUDIER et al., 2017). Lançada em 1998, a missão *GEOSAT follow-on (GFO)* deu sequência às observações GEOSAT. A Figura 8 apresenta o período de operação e o Quadro 1 apresenta algumas características dos principais satélites altimétricos empregados em observações do nível do mar. Na sequência, serão abordadas as principais missões de altimetria por satélite lançadas a partir da década de 1990.

Figura 8 – Período de duração das principais missões altimétricas oceânicas.



Fonte: Adaptada de AVISO (2022).

Quadro 1 – Características de alguns satélites altimétricos.

Missão	Altitude (km)	Inclinação	Repetitividade (dias)	Agências Responsáveis
Geosat	800	108°	17	Marinha dos EUA
ERS-1	785	98,52°	3 (calibração e gelo marinho), 35 (observações multidisciplinares do oceano) e 168 (aplicações geodésicas)	ESA
Topex/Poseidon	1336	66°	9,9156	NASA, CNES
GFO	800	108°	17	Marinha dos EUA e NOAA
ERS-2	785	98,52°	35	ESA
Envisat	782,4- 799,8	98,55°	30-35	ESA
Jason-1	1336	66°	9,9156	CNES e NASA
Jason-2	1336	66°	9,9156	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA
CFOSAT	500	97,5°	13	CNES e CNSA
Sentinel-3	814,5	98,645589°	Ciclo de repetição de 27 dias, 14 + 7/27 órbitas por dia	ESA
Jason-3	1336	66°	10	CNES, NASA, EUMETSAT e NOAA
Saral	800	98,55°	35	ISRO e CNES
HY-2	971	99,3°	14,168	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial
Cryosat-2	717	92°	369 dias com subciclo de 30 dias	ESA
Swot	890	77,6°	-	CNES, NASA, CSA e UKSA
Jason-CS, Sentinel-6A e 6B	1336	66°	10	ESA, EUMETSAT, EU, CNES, NOAA e NASA

Fonte: AVISO (2022).

O satélite *European Remote Sensing Satellite -1* (ERS-1) permitiu imagens de alta resolução em todas as condições climáticas sobre a Terra, determinação da altura e comprimento das ondas, da velocidade e direção do vento, de vários parâmetros de gelo, de temperaturas da superfície oceânica, da cobertura de nuvens, do conteúdo de vapor da água atmosférico e também possibilitou a altimetria precisa sobre oceanos e geleiras (SEEBER, 2003). Em função da natureza multidisciplinar pela qual a missão ERS-1 foi planejada, foram utilizados diferentes períodos orbitais (AVISO, 2022): um período de três dias para calibração (de 28/12/1991 a 30/03/1992) e observação do gelo marinho (de 24/12/1993 a 10/04/1994); um período de 168 dias para aplicações geodésicas (de 04/ 10/1994 a 28/09/1994 e de 28/09/1994 a 21/03/1995); e um período de 35 dias para observações multidisciplinares do oceano (para as outras datas).

Antes do encerramento da missão ERS-1, em 2000, foi lançada a missão ERS-2 em 1995 pela Agência Espacial Europeia (ESA) e em 2011 ao reduzir para uma órbita mais baixa, o ERS-2 foi colocado fora de operação (AVISO, 2022). O sucessor das missões ERS-1/2 foi o satélite *Environmental Satellite* (ENVISAT) que objetivou estudos ambientais e observação da atmosfera, do oceano, da terra e da cobertura de gelo (SEEBER, 2003). Desse modo, o período orbital do satélite ENVISAT é semelhante ao satélite ERS-2 e em algumas fases do ERS-1, conforme pode ser visto no Quadro 1. Segundo ESA (2020), para dar sequência nas observações das missões ERS-1 e 2 e ENVISAT como também para contribuir ao programa *Global Monitoring for Environment and Security* (GMES), a ESA vem dedicando esforços para o lançamento de seis novas missões satelitais, denominadas Sentinel 1, 2, 3, 4, 5 e 6. Cada missão Sentinel apresenta uma diferente tecnologia embarcada o que permitirá o monitoramento terrestre, oceânico e atmosférico. No contexto do presente trabalho, a missão Sentinel-3 objetiva observar alterações do nível do mar, da temperatura e da cor da superfície oceânica e da terra, a fim de, apoiar sistemas de previsão da variação do nível do mar, monitoramento ambiental e climático. Os satélites gêmeos Sentinel-3A e Sentinel-3B foram lançados em 16 de fevereiro de 2016 e em 25 de abril de 2018, respectivamente, como pode ser visto na Figura 8.

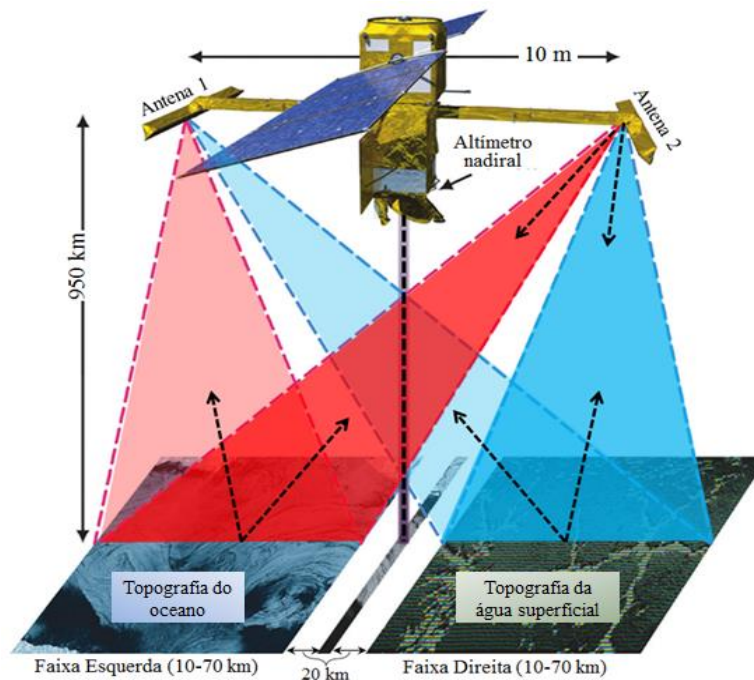
A missão *TOPEX/Poseidon* (T/P) foi lançada após 20 anos de esforços em desenvolvimento tecnológico para reduzir erros, aumentar a altitude orbital (para 1.336 km) e empregar frequências adicionais (5,3 GHz e 18 GHz), a fim de reduzir os efeitos de atraso ionosférico e velocidade do vento na medição de vapor de água (BENVENISTE, 2011). Segundo Plag e Pearlman (2009), a partir da missão T/P, as precisões

das observações de SSH melhoraram em um fator de 10 ou mais, permitindo pela primeira vez a determinação precisa da variabilidade temporal da superfície do oceano. Para dar continuidade aos registros do altímetro T/P, foram lançadas, na mesma órbita, as missões Jason-1, 2 e 3 (AVISO, 2022). Com o lançamento realizado em novembro de 2020 e a operações iniciada em junho de 2021, a missão Jason-CS/Sentinel-6A garantirá a continuidade das observações do Jason-3 e para 2026 está previsto o lançamento da missão Jason-CS/Sentinel-6B (AVISO, 2022).

Apesar de melhorias significativas na determinação do nível médio do mar ao longo dos anos, as observações de altimetria por satélites perdem resolução nas proximidades da costa em função da rugosidade da superfície do mar decorrente de perturbações causadas pela pequena profundidade e à interferência do terreno no sinal de retorno (DALAZOANA, 2006). No entanto, é justamente nessas regiões que os estudos acerca da variação do nível do mar são de grande importância, uma vez que, nelas se concentra uma parcela considerável da população mundial e um aumento do nível do mar, implica em possíveis inundações, erosões, aumento da salinização de aquíferos e perda do ecossistema costeiro (FENOGLIO-MARC et al., 2012). Para extrair melhores informações altimétricas nessas regiões realizam-se métodos de reprocessamento dos sinais, denominados “retracking”, que utilizam algoritmos com a finalidade de ajustar um modelo ou uma forma funcional às formas de onda observadas e recuperar os parâmetros geofísicos, como o  $R$ , a potência do eco, entre outros (GOMMENDINGER et al. 2011). Além disso, novas tecnologias, como as missões CryoSat-2 e Sentinel-3 transportam um altímetro baseado na tecnologia denominada radar interferométrico de abertura sintética (*Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter – SIRAL*) que emite pulsos contínuos de radar modulados com Atraso-Doppler (*Delay Doppler*) com frequência na banda Ku (13,575 GHz, largura de banda 350 MHz), capaz de observar o nível do mar com melhor qualidade em regiões costeiras em relação às missões anteriores (IDŽANOVIC'; OPHAUG; ANDERSEN, 2018).

O satélite *Surface Water Ocean Topography* (SWOT) está sendo desenvolvido pela NASA em conjunto com o *National Centre for Space Studies* (CNES), com contribuições da *Canadian Space Agency* (CSA) e da *United Kingdom Space Agency* (UKSA). Este satélite tem seu lançamento previsto para novembro de 2022 e será capaz de cobrir a maioria dos corpos oceânicos e de água doce do mundo, fornecendo observações detalhadas da topografia da superfície dos oceanos e da variabilidade temporal de outros corpos d'água (JPL-NASA, 2020). Os grandes espaçamentos entre as trilhas dos satélites altimétricos “tradicionais” ou de perfil, como por exemplo, as missões T/P e Jason-1 e 2, impedem observações de processos oceânicos de mesoescala. Desse modo, a missão SWOT empregará a tecnologia denominada altimetria de faixa ampla (*Wide-Swath Altimetry*) que visa alcançar uma largura de faixa de 120 km projetada sobre a Terra, conforme apresentado na Figura 9. Para isso, são instaladas duas antenas, cada uma fixa nas extremidades opostas de uma haste rígida de 10 m de comprimento, munidas com tecnologia *Ka-band Radar Interferometer* (KaRIn), na qual uma das antenas ilumina alternadamente duas faixas fora do nadir e ambas as antenas recebem os sinais refletidos. Na Figura 9 observa-se a antena 2 iluminando a faixa da esquerda e da direita e ambas as antenas (1 e 2) recebendo o sinal refletido. Desse modo, é criado um par interferométrico para cada faixa a partir da combinação do sinal refletido pela superfície dos oceanos, gelo, rios e lagos e recebido pelas antenas simultaneamente. No espaço central, um altímetro nadiral, semelhante ao que foi usado nos satélites T/P e Jason, fornece observações de  $R$  com uma separação entre as faixas de 20 km (RODRIGUEZ et al., 2017).

Figura 9 – Princípio de funcionamento da missão SWOT.

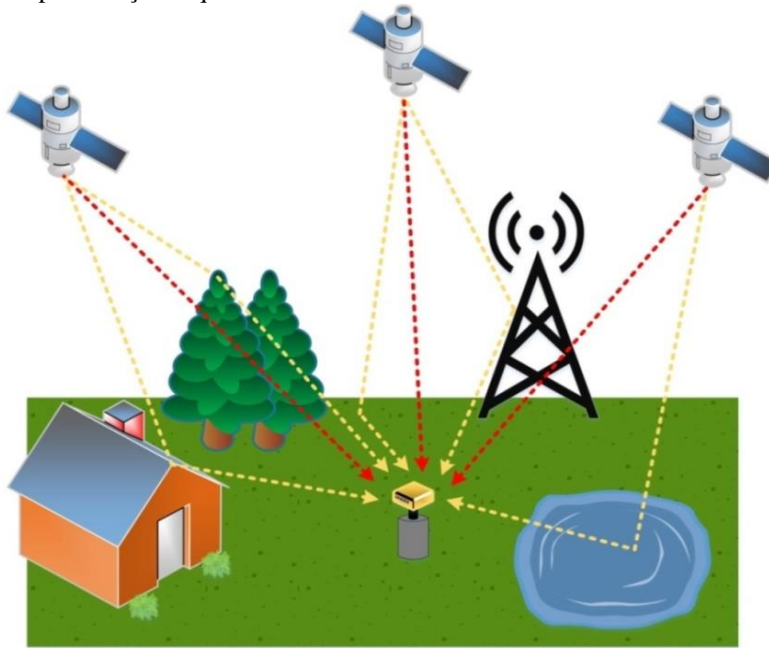


Fonte: Adaptada de JPL-NASA (2020).

#### 4 REFLETOMETRIA GNSS

Diversos erros afetam a qualidade do posicionamento GNSS, como por exemplo, erros de propagação do sinal, erros da órbita do satélite, erros do relógio do satélite e do receptor (MONICO, 2008). Dentre os erros de propagação do sinal, a influência do efeito de multicaminho tem sido amplamente investigada nas últimas duas décadas, uma vez que, as características dos sinais recebidos pelo receptor após estes serem refletidos por superfícies vizinhas, variam em função da cobertura e de propriedades inerentes à superfície refletora (LOWE et al., 2002; ROUSSEL et al., 2015). Esta técnica, denominada Refletometria GNSS ou GNSS-R permitiu o desenvolvimento de novas aplicações aos sistemas GNSS, como por exemplo: determinação da umidade do solo (CHANG et al., 2019; EURIQUES, 2019; LARSON et al., 2008); monitoramento do nível do mar (LÖFGREN, 2014; ROUSSEL et al., 2015; LARSON; RAY; WILLIAMS, 2017; FAGUNDES; IESCHECK; NIEVINSKI, 2020; YAMAWAKI; NIEVINSKI, 2020); altura das ondas (ALONSO-ARROYO et al., 2015); camada de neve (NIEVINSKI; LARSON, 2014a; NIEVINSKI; LARSON, 2014b; CARDELLACH et al., 2012); e cobertura vegetal (FERRAZZOLI et al., 2011; RODRIGUEZ-ALVAREZ et al., 2012). Uma descrição mais detalhada das aplicações GNSS-R pode ser encontrada em Cardellach et al. (2011). A Figura 10 representa esquematicamente as diferentes superfícies que podem refletir os sinais emitidos pelos satélites antes de alcançar a antena do receptor GNSS.

Figura 10 – Representação esquemática das diferentes fontes de multicaminho dos sinais GNSS.



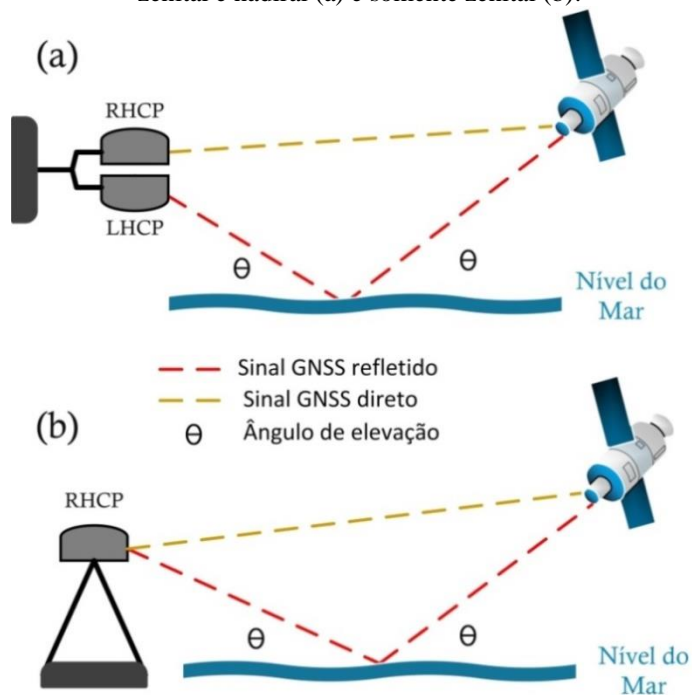
Elaboração: Os autores (2020).

O efeito do multicaminho afeta a qualidade de todas as observáveis GNSS: código (pseudodistância), onda portadora (fase) e *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) (RAY; CANNON, 2001). Dentre estas, LARSON et al. (2008) destacam algumas vantagens atribuídas à adoção da SNR para a técnica GNSS-R: baixo nível de ruído da fase do sinal de multicaminho, independente de erros orbitais, atrasos atmosféricos e erros de relógios e ainda os dados da SNR podem ser analisados separadamente para cada satélite. Segundo Larson et al. (2010), o valor de SNR é determinado pela razão entre a potência e o ruído do sinal que chega no receptor, sendo sua unidade representada, frequentemente, em escala logarítmica de decibéis (dB) ou decibéis-Hertz (dB-Hz).

O conceito de altimetria oceânica baseada em refletometria GNSS foi proposto pela primeira vez por Martin-Neira et al. (1993). De modo geral, o princípio considera que o atraso de tempo (*Time Delay*) entre os sinais diretos e refletidos, está diretamente correlacionado com a diferença de altura entre o receptor e a superfície refletora (ROUSSEL et al., 2015). As observações do nível do mar são realizadas pelo uso de duas antenas: uma com visada para o sentido zenital, a fim de receber o sinal direto (*Right-Hand Circularly Polarized* - RHCP) e a outra com visada para o sentido nadiral a fim de receber o sinal refletido (principalmente *Left-Hand Circularly Polarized* - LHCP), ambas montadas de modo que os seus centros de fase fiquem alinhados ao longo da vertical local (MARTIN-NEIRA et al., 2001; LÖFGREN; HAAS; JOHANSSON, 2011; LARSON; LÖFGREN; HAAS, 2013), conforme apresentado na Figura 11a.

Embora o objetivo da antena RHCP, direcionada ao zênite, seja maximizar o sinal direto e suprimir os sinais refletidos, é sabido que ela não rejeita completamente a energia dos sinais refletidos. À vista disso, Larson, Löfgren e Haas (2013) apresentam um método para monitorar o nível do mar local pela utilização de um único receptor GNSS com qualidade geodésica, conforme apresentado na Figura 11b.

Figura 11 – Esquema para observações do nível do mar através de receptor GNSS com antena posicionada no sentido: zenital e nadiral (a) e somente zenital (b).



Fonte: Adaptada de Larson, Löfgren e Haas (2013).

Nievinski et al. (2020) apresentaram os resultados da primeira campanha GNSS-R, realizada com apoio da IAG, que visa determinar a correlação entre os dados maregráficos e as soluções GNSS-R para a observável SNR. Os dados foram fornecidos pelo *Onsala Space Observatory* (OSO) para o período de 1 ano (2015- 2016). As soluções da observável SNR para o sinal GPS L1-C/A foram geradas por quatro grupos: da Suécia, Luxemburgo/Brasil, Alemanha e Reino Unido. Os resultados indicaram coeficientes de correlação superiores a 0,9 e RMSE menor que 5 cm.

Fagundes (2020) apresenta resultados obtidos a partir do desenvolvimento de um sensor de baixo custo baseado na técnica GNSS-R. A validação do sensor foi feita por meio de testes junto ao rio Guaíba em Porto Alegre (RS). A comparação dos dados do sensor com dados provenientes de um sensor maregráfico por radar, para um período de aproximadamente 5 meses, apresentou uma correlação de 0,989 e um RMSE de 2,9 cm. Pelo fato do receptor GNSS observar múltiplos satélites com diferentes ângulos de elevação e azimute a cada época, os sinais refletidos terão diferentes ângulos de incidência. Nesse sentido, o monitoramento do nível do mar é realizado por meio da variação de uma superfície média do mar formada por um conjunto de pontos refletidos e posteriormente incididos no receptor (LÖFGREN; HAAS; JOHANSSON, 2011). Além disso, a alta rugosidade da superfície oceânica, principalmente em regiões costeiras, faz com que o sinal GNSS refletido se espalhe para várias direções. À vista disso, Löfgren, Haas e Johansson (2011) recomendam posicionar a antena sobre águas mais calmas, como por exemplo, em uma baía.

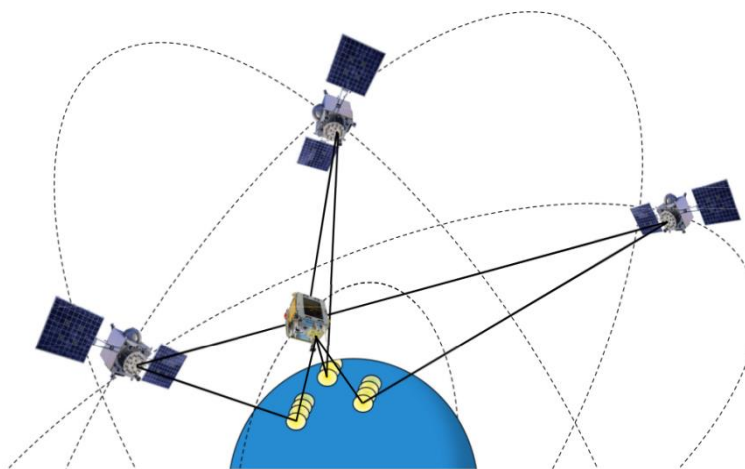
Segundo Roussel et al. (2015), os sinais emitidos pelos satélites e refletidos pela superfície da Terra, podem mudar de polarização em função do tipo de refletor (coeficiente de reflexão) e do ângulo de incidência (o ângulo no qual o sinal atinge a antena do refletor -  $\theta$ ). O ângulo que permite estimar a ocorrência de inversão da polarização do sinal é denominado ângulo de Brewster. Se o valor de  $\theta$  for maior que o ângulo de Brewster, a componente predominante do sinal é a LHCP. Em caso do valor de  $\theta$  ser menor que o ângulo de Brewster a componente predominante do sinal é a RHCP. Para a água do mar o ângulo de Brewster equivale a  $8^\circ$  de acordo com Hannah (2001). No entanto, a utilização de propriedades de polarização dos sinais GNSS é classificada por Roussel et al. (2015) como um método SNR clássico. A mesma referência apresenta um método SNR dinâmico (*dynamic SNR method*) para recuperar os dados de níveis de água por meio das informações de SNR em condições extremas, como é o caso de regiões oceânicas costeiras, onde o método clássico não é o ideal. A metodologia é baseada na determinação da frequência da oscilação de multicaminhos a partir dos dados SNR de cada satélite GNSS, visto que os sinais diretos apresentam grandes amplitudes e



baixa frequência, enquanto que os sinais refletidos, baixas amplitudes e alta frequência. Essa frequência da oscilação de multicaminhos é diretamente proporcional à altura do receptor acima da superfície refletora e, portanto, às variações da superfície do mar.

Além da utilização de receptores GNSS terrestres, também foi lançada em julho de 2014, pela Agência Espacial do Reino Unido e Europeia, a missão experimental denominada TechDemoSat-1 (TDS-1) com tecnologia GNSS-R a bordo (JALES; UNWIN, 2015). De acordo com Mashburn et al. (2018), o satélite TDS-1 transporta uma antena RHCP para o rastreamento dos sinais GPS diretos e uma antena LHCP para rastreamento dos sinais GPS refletidos sobre a superfície d'água, representados pelos pontos amarelos na Figura 12. Com base na solução da posição do satélite TDS-1, por meio dos sinais diretos e nas efemérides transmitidas pelo GPS, um modelo computacional geométrico permite a previsão da localização e do atraso dos sinais refletidos na superfície da Terra. A correlação entre o sinal recebido pela antena nadir do TDS-1 após este ser refletido na superfície oceânica e sua réplica, gerada localmente, compensado pelo atraso estimado e o atraso Doppler, permite a confecção de *Delay Doppler Maps* (DDMs).

Figura 12 – Geometria de reflexão dos satélites GPS e TDS-1.



Fonte: Mashburn et al. (2018).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A altimetria por satélite realiza observações do nível do mar em uma cobertura global relativamente a um sistema de referência geocêntrico. Desde o início da década de 1990 ocorre o lançamento de satélites com as mesmas características orbitais o que possibilita observações contínuas ao longo dos anos. Citam-se, como exemplo, as missões TOPEX/Poseidon, Jason 1, 2 e 3, respectivamente. Um fator limitante desta técnica é a perda de resolução nas proximidades da costa. O emprego da tecnologia SIRAL possibilita observações de melhor qualidade nestas regiões e o futuro lançamento da missão SWOT permitirá o aprimoramento nos estudos relacionados ao monitoramento do nível do mar.

As estações maregráficas realizam observações pontuais relativamente a um referencial local e, portanto, estes dados podem estar contaminados por movimentos verticais da crosta, daí a importância da implantação de estações GNSS nas proximidades das estações maregráficas. Uma das principais vantagens das observações maregráficas é o período mais longo das séries temporais, como exemplo, o marégrafo de Cananéia (SP) possui uma série de 54 anos de observações (1954-2006).

A refletometria GNSS oceânica tem grande potencial para tornar-se uma técnica relevante dentro dos propósitos da Geodésia por realizar observações absolutas do nível do mar e discriminar movimentos verticais da crosta de forma simultânea. A implantação de estações de monitoramento contínuo em regiões costeiras, em locais adequados, permitiria além da densificação de redes geodésicas de referência tridimensional, o uso mais sistemático da técnica GNSS-R para o monitoramento do nível do mar.

A altimetria por satélites e a refletometria GNSS possibilitam a execução de estudos relacionados ao monitoramento do nível do mar, especialmente em regiões costeiras com uma baixa densidade de estações

maregráficas instaladas e/ou com curta duração das séries temporais de observação maregráfica.

Os estudos relacionados ao monitoramento do nível do mar têm um impacto importante em vista das mudanças globais pelas quais o planeta vem passando e que tem propiciado a ocorrência cada vez mais frequente de eventos extremos com altos custos econômicos e humanos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 pela concessão da bolsa de estudo.

## Contribuição dos Autores

O autor Samoel Giehl foi responsável pela conceptualização e investigação da pesquisa, redigiu a minuta inicial e realizou revisões e edições. A autora Regiane Dalazoana auxiliou na definição da ideia e em revisões e supervisões deste artigo.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

## Referências

- ABLAIN, M.; CAZENAVE, A.; VALLADEAU, G.; GUINEHUT, S. A New Assessment of the Error Budget of Global Mean Sea Level Rate Estimated by Satellite Altimetry over 1993–2008. **Ocean Science**, France, v. 5, n. 2, p. 193–201, 2009. DOI. 10.5194/os-5-193-2009.
- ALENCAR, J. C. M. de. **Datum Altimétrico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1990. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/1999-1989/3130-datum-altimetrico-brasileiro>>. Acesso em: 16 Out. 2019.
- ALONSO-ARROYO, A.; CAMPS, A.; PARK, H.; PASCUAL, D.; ONRUBIA, R.; MARTIN, F. Retrieval of Significant Wave Height and Mean Sea Surface Level Using the GNSS-R Interference Pattern Technique: Results From a Three-Month Field Campaign. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**, Barcelona (Espanha), v. 53, n. 6, p. 3198–3209, 2015. DOI. 10.1109/tgrs.2014.2371540.
- ANDERSEN, O. B.; SCHARROO, R. Range and Geophysical Corrections in Coastal Regions: and Implications for Mean Sea Surface Determination. In: VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. **Coastal Altimetry**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p. 103–146.
- ARCHIVING, VALIDATION AND INTERPRETATION OF SATELLITE OCEANOGRAPHIC DATA (AVISO). **Missions**. Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions>>. Acesso em: 10 fev.2022.
- BARNETT, T. P. The Estimation of “Global” Sea Level Change: A Problem of Uniqueness. **Journal of Geophysical Research, American Geophysical Union (AGU)**, [s.l.], v. 89, n. C5, p. 7980, 1984. DOI. 10.1029/jc089ic05p07980.
- BENVENISTE, J. Radar Altimetry: Past, Present and Future. In: VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. **Coastal Altimetry**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p. 1–17.
- BRENNER, A. C.; KOBLINSKY, C. J.; BECKLEY, B. D. A Preliminary Estimate of Geoid-Induced Variations in Repeat Orbit Satellite Altimeter Observations. **Journal of Geophysical Research**, [s.l.], v. 95, n. 3, p.3033, 1990. DOI. 10.1029/jc095ic03p03033.
- CARDELLACH, E.; FABRA, F.; NOGUÉS-CORREIG, O.; OLIVERAS, S.; RIBÓ, S.; RIUS, A. GNSS-

- R Ground-Based and Airborne Campaigns for Ocean, Land, Ice, and Snow Techniques: Application to the Gold-Rtr Data Sets. **Radio Science**, [s.l.], v. 46, n. 6, 2011. DOI. 10.1029/2011rs004683.
- CARDELLACH, E.; FABRA, F.; RIUS, A.; PETTINATO, S.; D'ADDIO, S. Characterization of Dry-Snow Sub-Structure Using GnsS Reflected Signals. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 124, p.122-134, 2012. DOI. 10.1016/j.rse.2012.05.012.
- CARTWRIGHT, D. E. **Tides: A Scientific History**. [s.l.]: Cambridge University Press, 1999.
- MONTECINO, H. D. C. **Avaliação das Variações Temporais nos Sistemas de Referência Verticais na América do Sul baseada em Observações GPS e GRACE**. 2018. 217 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- MONTECINO, H. D. C.; FERREIRA, V. G.; CORDERO, A. C.; CABRERA, L. C.; BÁEZ, J. C. S.; FREITAS, S. R. C. de. Vertical Deformation and Sea Level Changes in The Coast of Chile by Satellite Altimetry and Tide Gauges. **International Journal of Remote Sensing**, Taylor Francis, v. 38, n. 24, p. 7551–7565, 2017. DOI: 10.1080/01431161.2017.1288306.
- CHAMBERS, D. P. Gravimetric Methods - Satellite Altimeter Measurements. In: SCHUBERT, G. **Treatise on Geophysics (Second Edition)**. Oxford: Elsevier, 2015. p. 117–149.
- CHANG, X.; JIN, T.; YU, K.; LI, Y.; LI, J.; ZHANG, Q. Soil Moisture Estimation by GNSS Multipath Signal. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 11, n. 21, p. 2559, 31, 2019. DOI. 10.3390/rs11212559.
- CHELTON, D. B.; RIES, J. C.; HAINES, B. J.; LEE-LUENGFU; CALLAHAN, P. S. Satellite Altimetry. In: FU, L.-L.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications**. Boca Raton: Academic Press, 2001. p. 1 - 122.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA (CHM). **GLOSS-BRASIL** Rio de Janeiro: CHM, 2021. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-goos-brasil/gloss-brasil?fbclid=IwAR2OfTtnKTTTCicygqrT03olZqhwXKXtRCLt3igVYHSopCkhPUgyfzB2mP0>>. Acesso em: 12 mai. 2021.
- DA SILVA, L. M. **Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba**. 2017. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.
- DALAZOANA, R.; DE FREITAS, S. R. C. **Estudos Dirigidos à Análise Temporal do Datum Vertical Brasileiro**. 2006. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- DREWES, H. The changing objectives in geodetic research. *Zeitschrift für Geodäsie*, **Geo-Information und Landmanagement**, v. 131, n. 5, p. 1–7, 2006.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Mission Continuity**. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-mission-continuity>>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- ESCUDIER, P.; COUHERT, A.; MERCIER, F.; MALLET, A.; THIBAUT, P.; TRAN, N.; AMAROUCHE, L.; PICARD, B.; CARRERE, L.; DIBARBOURE, G.; ABLAIN, M.; RICHARD, J.; STEUNOU, N.; DUBOIS, P.; RIO, Marie-Hélène; DORANDEU, J. Satellite Radar Altimetry: Principle, Accuracy, and Precision. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces (Earth Observation of Global Changes)**. [S.l.]: CRC Press, 2017. p. 1-70.
- EURIQUES, J. F. **Determinação da Umidade do Solo por meio da Técnica de Refletometria GNSS: Primeiros resultados no Brasil**, 2019. 118 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- FAGUNDES, M. A. R. **Projeto e validação de sensor GPS/GNSS Refletométrico de Código Aberto e de Baixo Custo para Monitoramento da Altura da Superfície da Água**. 2020. 104 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento

Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

- FAGUNDES, M. A. R.; IESCHECK, A. L.; NIEVINSKI, F. G. Monitoramento da Altura da Superfície da Água com Sensor GPS/GNSS Refletométrico de Código Aberto. In: XI Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba. **Anais [..]** 2020. p. 291-292. Disponível em: <http://www.cbcbg.ufpr.br/>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- FENOGLIO-MARC, L.; SCHÖNE, T.; ILLIGNER, J.; BECKER, M.; MANURUNG, P.; KHAFID. Sea Level Change and Vertical Motion from Satellite Altimetry, Tide Gauges and GPS in the Indonesian Region. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.137-150, 2012. DOI. 10.1080/01490419.2012.718682.
- FERRAZZOLI, P.; GUERRIERO, L.; PIERDICCA, N.; RAHMOUNE, R. Forest Biomass Monitoring with GNSS-R: Theoretical Simulations. **Advances In Space Research**, [s.l.], v. 47, n. 10, p.1823-1832, 2011. DOI. 10.1016/j.asr.2010.04.025.
- FLICKR (Site da web de hospedagem e compartilhamento de imagens). Disponível em: <<https://www.flickr.com/photos/davidstanleytravel/8590204613>>. Acesso em: 11 jul. 2020.
- GLOBAL GEODETIC OBSERVING SYSTEM (GGOS). **Global Geodetic Observing System**. Disponível em: <<http://www.ggos.org>>. Acesso em: 11 mai. 2021.
- GLOBAL SEA LEVEL OBSERVING SYSTEM (GLOSS). **The Global Sea Level Observing System: implementation plan**. 100. ed. Paris: UNESCO/IOC, 2012. 41 p. Disponível em: <[https://www.sonel.org/IMG/pdf/gloss\\_implementationplan\\_2012.pdf](https://www.sonel.org/IMG/pdf/gloss_implementationplan_2012.pdf)>. Acesso em: 08 fev. 2022.
- GOMMENGINGER, C.; THIBAUT, P.; FENOGLIO-MARC, L.; QUARTLY, G.; DENG, X.; GÓMEZ-ENRI, J.; CHALLENGER, P.; GAO, Y. Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. In: VIGNUDELLI, S.; KOSTIANOY, A. G.; CIPOLLINI, P.; BENVENISTE, J. **Coastal Altimetry**. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011. p. 61–101.
- HANNAH, B. M. **Modelling and Simulation of GPS Multipath Propagation**. 2001. Thesis (Doctor of Philosophy) – Queensland University of Technology, Queensland, 2001.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical Geodesy**. Wien New York: Springer Science & Business Media, 2006.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEODESY (IAG). **Definition and Realization of an International Height Reference System (IHR)**. Prague, Czech Republic, 2015. Disponível em: <[https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG\\_Resolutions\\_2015.pdf](https://iag.dgfi.tum.de/fileadmin/IAG-docs/IAG_Resolutions_2015.pdf)>. Acesso em: 24 Mai. 2020.
- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. Paris: UNESCO, v. 2, 1994. Disponível em: <[https://www.psmsl.org/train\\_and\\_info/training/manuals/ioc\\_14ii.pdf](https://www.psmsl.org/train_and_info/training/manuals/ioc_14ii.pdf)>. Acesso em: 10 Fev. 2020.
- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation**. Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guides No. 14. Paris: UNESCO v. IV, n. 31, 2006. Disponível em: <[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=9328](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9328)>. Acesso em: 18 Fev. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), **Instruções Técnicas para Controle Geodésico de Estações Maregráficas - CGEM e sua Vinculação Vertical ao Sistema Geodésico Brasileiro – SGB**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101635.pdf>>. Acesso em: 10 Dez. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG 2001/2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em: <[ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio\\_RMPG\\_2001\\_2015\\_GRRV.pdf](ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/relatorio_RMPG_2001_2015_GRRV.pdf)>. Acesso em: 10 Set. 2019.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Breve Análise dos Primeiros Resultados da RMPG em 2002**. Rio de Janeiro: IBGE, 2002. Disponível em: [http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rmpg/relatorio/resultados\\_2002.pdf](http://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rmpg/relatorio/resultados_2002.pdf)>. Acesso em: 12 Out. 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Rede Maregráfica Permanente para Geodésia (RMPG)**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/10842-rmpg-rede-maregrafica-permanente-para-geodesia?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 11 set. 2019.
- IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. Coastal Sea Level from CryoSat-2 SARIn Altimetry in Norway. **Advances In Space Research**, [s.l.], v. 62, n. 6, p.1344-1357, 2018. DOI. 10.1016/j.asr.2017.07.043.
- JALES, P; UNWIN, M. **Mission Description-GNSS Reflectometry on TDS-1 with the SGR-ReSI**. Guildford (UK): Surrey Satellite Technology Ltd, 2015.
- JET PROPULSION LABORATORY - NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (JPL-NASA). **Surface Water Ocean Topography Satellite Mission (SWOT)**. Disponível em: <<https://swot.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- KAULA, W. M. et al. **The Terrestrial Environment: Solid Earth and Ocean Physics**. NASA Contractor Report, v. 1579, 1970.
- LARSON, K. M; BRAUN, J. J.; SMALL, E. E.; ZAVOROTNY, V. U.; GUTMANN, E. D.; BILICH, A. L. **GPS Multipath and its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content**. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE, v. 3, n. 1, p. 91–99, 2010.
- LARSON, K. M; LÖFGREN, J. S; HAAS, R. **Coastal sea Level Measurements Using a Single Geodetic GPS Receiver**. Advances in Space Research, Elsevier, v. 51, n. 8, p. 1301–1310, 2013.
- LARSON, K. M.; RAY, R. D.; WILLIAMS, S. D. P. **A 10-year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver Versus a Conventional Tide Gauge**. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 34, n. 2, p. 295–307, 2017.
- LARSON, K. M.; SMALL, E. E.; GUTMANN, E. D.; BILICH, A. L.; BRAUN, John J; ZAVOROTNY, Valery U. **Use of GPS Receivers as a Soil Moisture 29 Network for Water Cycle Studies**. **Geophysical Research Letters**, Wiley Online Library, v. 35, n. 24, 2008.
- LÖFGREN, J. **Local Sea Level Observations using Reflected GNSS Signals**. 2014. 86 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Earth and Space Sciences, Chalmers University of Technology, Gothenburg (Sweden), 2014.
- LÖFGREN, J. S.; HAAS, R.; JOHANSSON, J. M. Monitoring Coastal Sea Level Using Reflected Gns signals. **Advances In Space Research**, [s.l.], v. 47, n. 2, p.213-220, 2011. DOI. 10.1016/j.asr.2010.08.015.
- LOWE, S. T.; LABRECQUE, J. L.; ZUFFADA, C.; ROMANS, L. J.; YOUNG, L. E.; HAJJ, G. A. First Spaceborne Observation of an Earth-Reflected GPS Signal. **Radio Science**, [s.l.], v. 37, n. 1, p.7-1, 2002. DOI. 10.1029/2000rs002539.
- LU, Z.; QU, Y.; QIAO, S. **Geodesy: Introduction to Geodetic Datum and Geodetic Systems**. [s.l.]: Springer, 2014.
- LUZ, R. T. **Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS**. 2008. 228 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.
- LUZ, R. T.; DE FREITAS, S. R. C.; DALAZOANA, R. Acompanhamento do Datum Altimétrico IMBITUBA através das Redes Altimétrica e Maregráfica do Sistema Geodésico Brasileiro. In:

- Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra, VII, 2002, Anais. Santiago (Chile): 2002.**
- MARTIN-NEIRA, M. **A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): Application to Ocean Altimetry.** Noordwijk (Netherlands), v. 17, n. 4, p. 331–355, 1993.
- MARTIN-NEIRA, M.; CAPARRINI, M.; FONT-ROSSELLO, J; LANNELONGUE, S.; VALLMITJANA, C. S. **The PARIS Concept: An Experimental Demonstration of Sea Surface Altimetry using GPS Reflected Signals.** IEEE transactions on geoscience and remote sensing, IEEE, v. 39, n. 1, p. 142–150, 2001. DOI: 10.1109/36.898676.
- MASHBURN, J.; AXELRAD, P.; LOWE, S. T.; LARSON, K. M. Global Ocean Altimetry With GNSS Reflections From TechDemoSat-1. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s.l.], v. 56, n. 7, p.4088-4097, 2018. DOI. 10.1109/tgrs.2018.2823316.
- MENEZES, R. R. V.; SOUZA, L. M.; FERREIRA, I. O. Comparação das Variações do Nível Médio do Mar a partir de Dados de Altimetria por Satélites e Maregrafia em Fortaleza – CE. **Anuário do Instituto de Geociências**, 44: 35347. 2021. DOI. 1982-3908\_2021\_44\_35347.
- MÍGUEZ, B. M.; TESTUT, L.; WÖPPELMANN, G. Performance of Modern Tide Gauges: Towards mm-Level Accuracy. **Scientia Marina**, [S.L.], v. 76, n. 1, p. 221-228, 2012. Editorial CSIC. <http://dx.doi.org/10.3989/scimar.03618.18a>.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS.** São Paulo: UNESP, 2008.
- MORAY, R. Considerations and enquiries concerning tides, by Sir Robert Moray; likewise for a further search into Dr. Wallis's newly publish't hypothesis. **Philosophical Transactions of The Royal Society Of London**, [s.l.], v. 1, n. 17, p.298-301, 1665. DOI. 10.1098/rstl.1665.0113.
- NEREM, R. S.; ABLAIN, M.; CAZENAVE, A.; CHURCH, J.; LEULIETTE, E. A 25-Year Satellite Altimetry-Based Global Mean Sea Level Record: Closure of the Sea Level Budget and Missing Components. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces (Earth Observation of Global Changes)**. [S.l.]: CRC Press, 2017. p. 187-210.
- NICHOLLS, R. J.; CAZENAVE, A. Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. **Science**, [s.l.], v. 328, n. 5985, p.1517-1520, 2010. DOI. 10.1126/science.1185782.
- NIEVINSKI, F. G.; HOBIGER, T.; HAAS, R.; LIU, W.; STRANDBERG, J.; TABIBI, S.; VEY, S.; WICKERT, J.; WILLIAMS, S. **SNR-based GNSS Reflectometry for Coastal Sea-Level Altimetry: Results from the First IAG Inter-Comparison Campaign.** Journal of Geodesy, Springer Science e Business Media LLC, v. 94, n. 8, 2020. DOI:10.1007/s00190-020-01387-3.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation – Part I: Formulation and Simulations. In: **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. [s.l.], v.52, 10, p. 6555-6563, 2014a. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2297681.
- NIEVINSKI, F. G.; LARSON, K. M. Inverse Modeling of GPS Multipath for Snow Depth Estimation – Part II: Application and Validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, [s.l.], v. 52, n. 10, p.6564-6573, 2014b. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2297688.
- PALMER, H. R. XII. Description of a Graphical Registrar of Tides and Winds. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, The Royal Society, [s.l.], v. 121, p. 209–213, 1831. DOI: 10.1098/rstl.1831.0013.
- PLAG, H. P.; PEARLMAN, M. **Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020.** Reno e Cambridge (EUA): Springer Berlin, Heidelberg, 2009.
- PERMANENT SERVICE FOR MEAN SEA LEVEL (PSMSL). **Obtaining Tide Gauge Data.** Disponível em: <<https://www.psmsl.org/>>. Acesso em: 20 dez. 2019.
- PUGH, D. T.; WOODWORTH, P. **Sea Level Science.** Liverpool: Cambridge University Press, 2014.
- RAY, J. K.; CANNON, M. E. Synergy Between Global Positioning System Code, Carrier, and Signal-to-Noise Ratio Multipath Errors. **Journal of Guidance, Control, and Dynamics**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 54-63, 2001.

DOI. 10.2514/2.4675.

- RIBEIRO, L. C. **Contribuição para o Estabelecimento do IHRF no Estado de São Paulo**. 2019. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.
- RODRIGUEZ-ALVAREZ, N.; BOSCH-LLUIS, X.; CAMPS, A.; RAMOS-PEREZ, I.; VALENCIA, E.; PARK, H.; VALL-LLOSSERA, M. Vegetation Water Content Estimation Using GNSS Measurements. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, [s.l.], v. 9, n. 2, p.282-286, 2012. DOI: 10.1109/lgrs.2011.2166242.
- RODRIGUEZ, E.; FERNANDEZ, D. E.; PERAL, E.; CHEN, C. W.; BLESER, J.-W. De; WILLIAMS, B.. Wide-Swath Altimetry: A Review. In: STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite Altimetry over Oceans and Land Surfaces**. Boca Raton, FL, (EUA): CRC Press, p. 71–112. 2017. DOI: 10.1201/9781315151779-2.
- ROUSSEL, N.; RAMILLIEN, G.; FRAPPART, F.; DARROZES, J.; GAY, A.; BIANCALE, R.; STRIEBIG, N.; HANQUIEZ, V.; BERTIN, X.; ALLAIN, D. Sea Level Monitoring and Sea State Estimate Using a Single Geodetic Receiver. **Remote Sensing of Environment**, [s.l.], v. 171, p. 261-277, 2015. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.011.
- SANTACRUZ, A. J.; DE FREITAS, S.. Geração de Funcionais da Gravidade a partir de Observações Aerogravimétricas e de Modelos Geodésicos Globais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 73, p. 245–260, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n1-57774.
- SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios. **Revista Brasileira de Cartografia**, Uberlândia, v. 72, n. 2, p. 345-364, 2020. DOI: 10.14393/rbcv72n2-52611.
- SCHUTZ, B. E.; ZWALLY, H. J.; SHUMAN, C. A.; HANCOCK, D.; DIMARZIO, J. P. **Overview of the ICESat Mission**. *Geophysical Research Letters*, Wiley Online Library, [s.l.], v. 32, n. 21, 2005. DOI: 10.1029/2005GL024009.
- SEEBER, G. **Satellite Geodesy**. Berlin: Walter De Gruyter, 2003.
- SÁNCHEZ, J. L. C.; FREITAS, S. R. C. de; BARZAGHI, Riccardo. Offset Evaluation of the Ecuadorian Vertical Datum Related to the IHRF. **Boletim de Ciências Geodésicas**, FapUNIFESP (SciELO), [s.l.], v. 24, n. 4, p. 503–525, 2018. DOI: 10.1590/s1982-21702018000400031.
- TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. 4. ed. Berlin-Boson: Walter De Gruyter, 2012.
- UNIVERSITY OF HAWAII SEA LEVEL CENTER (UHSLC). Disponível em: <<http://uhslc.soest.hawaii.edu/data/>>. Acesso em: 20 out. 2019.
- YAMAWAKI, M. K.; NIEVINSKI, F. G. Refletometria por Satélites GPS/GNSS: Estudo Inicial de uma Matriz Vertical de Sensores. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésica, 2020, Curitiba. **Anais [...]**, p. 291-292. Disponível em: <<http://www.cbcg.ufpr.br/>>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- ZWALLY, H. J.; SCHUTZ, B.; ABDALATI, W.; ABSHIRE, J.; BENTLEY, C.; BRENNER, A.; BUFTON, J.; DEZIO, J.; HANCOCK, D.; HARDING, D.; HERRING, T.; MINSTER, B.; QUINN, K.; PALM, S.; SPINHIRNE, J.; THOMAS, R. ICESat's Laser Measurements of Polar Ice, Atmosphere, Ocean, and Land. **Journal of Geodynamics**, Elsevier BV, [s.l.], v. 34, n. 3-4, p. 405–445, 2002.
- WOODWORTH, P. L.; VASSIE, J. M.; SPENCER, R.; SMITH, D. E. Precise Datum Control for Pressure Tide Gauges. **Marine Geodesy**, [s.l.], v. 19, n. 1, p. 1-20, 1996. DOI: 10.1080/01490419609388068.

## Biografia do autor principal



Samoel Giehl nasceu em São Paulo das Missões – RS, em 1991. Coursou Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas (2013-2018). Fez mestrado acadêmico no Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná (PPGCG/UFPR) (2018-2020). Atualmente faz doutorado no mesmo programa de Pós-Graduação, atuando como bolsista financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Tem interesse nos seguintes temas: Integração de dados maregráficos e de altimetria por satélite; Sistemas de monitoramento do planeta Terra; Referenciais Verticais; e Monitoramento do nível do mar.



Esta obra está licenciado com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.