

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

LEONARD NIERO DA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS ORBITAIS E NIVELAMENTO  
HIDROGRÁFICO EM CORPOS HÍDRICOS CONTINENTAIS PARA A  
INTEGRAÇÃO DE REFERENCIAIS VERTICAIS**

PORTO ALEGRE

2023

LEONARD NIERO DA SILVEIRA

**APLICAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS ORBITAIS E NIVELAMENTO  
HIDROGRÁFICO EM CORPOS HÍDRICOS CONTINENTAIS PARA A  
INTEGRAÇÃO DE REFERENCIAIS VERTICAIS**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento.

**Orientador:** Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski  
**Coorientador:** Prof. Dr. Sergio Florêncio de Souza

PORTO ALEGRE

2023

### CIP - Catalogação na Publicação

Niero da Silveira, Leonard  
APLICAÇÃO DE DADOS ALTIMÉTRICOS ORBITAIS E  
NIVELAMENTO HIDROGRÁFICO EM CORPOS HÍDRICOS  
CONTINENTAIS PARA A INTEGRAÇÃO DE REFERENCIAIS  
VERTICAIS / Leonard Niero da Silveira. -- 2023.  
262 f.  
Orientador: Felipe Geremia Nievinski.

Coorientador: Sergio Florêncio de Souza.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Altimetria. 2. Geodésia. 3. Satélite. 4. Nivelamento. 5. Hidrografia. I. Geremia Nievinski, Felipe, orient. II. Florêncio de Souza, Sergio, coorient. III. Título.

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO**

**TESE**

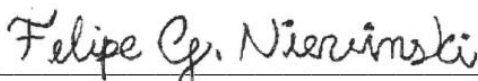
Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

**DOCTOR EM SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO**

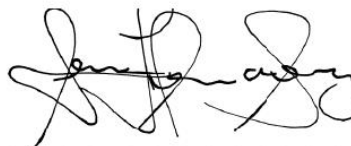
Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)  
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM)  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Porto Alegre, RS, Brasil.

Aprovada em: 18 de dezembro de 2023.


Pela Banca Examinadora:




Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski  
Orientador



Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza  
Coorientador (UFRGS)

Documento assinado digitalmente  
 **CLAUDIA PEREIRA KRUEGER**  
Data: 18/12/2023 17:55:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Prof. Dra. Claudia Pereira Krueger  
(UFPR)

Documento assinado digitalmente  
 **DANIEL MEDEIROS MOREIRA**  
Data: 21/12/2023 17:39:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Daniel Moreira  
(CPRM)

Documento assinado digitalmente  
 **FABRICIO SANGUINETTI CRUZ DE OLIVEIRA**  
Data: 18/12/2023 21:43:21-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fabrício Oliveira  
(FURG)

Documento assinado digitalmente  
 **REGINALDO MACEDONIO DA SILVA**  
Data: 18/12/2023 18:06:44-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Reginaldo Macedonio da Silva  
(PPGSR/UFRGS)

Homologada em: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_.

Por:

\_\_\_\_\_  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação  
em Sensoriamento Remoto  
PPGSR/UFRGS

**Observação:** Esta Ata não pode ser considerada como instrumento final do processo de concessão de título ao aluno.



Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Carlos e Ana, minha esposa Lizandra e minhas filhas Gabriella e Nathalia por todo incentivo e ajuda para que isso fosse possível.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade Federal do Pampa pela concessão do afastamento para qualificação, que proporcionou a oportunidade para a realização desta pesquisa.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo espaço de formação e pelas experiências enriquecedoras.

Aos meus orientadores Professores Doutores Felipe Geremia Nievinski e Sergio Florêncio de Souza pelas contribuições inestimáveis na construção desse trabalho, em minha formação e pela paciência nesta caminhada.

Ao graduando de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura Douglas Bueno Leipelt pela ajuda na coleta de dados de campo.

À Professora Doutora Cláudia Pereira Krueger, aos Professores Doutores Fabrício Sanguinetti Cruz de Oliveira e Reginaldo Macedônio da Silva e ao Doutor Daniel Medeiros Moreira pela avaliação deste trabalho e contribuições inestimáveis para torná-lo ainda melhor.

Aos meus colegas de curso que participaram, em vários momentos, da construção desse estudo.

Aos meus familiares pelo incentivo e pela presença em todos os momentos da minha vida.

Aos sujeitos pesquisados pela parceria e compreensão imprescindíveis para a construção desse trabalho.

Se eu vi mais longe foi por estar  
sobre ombros de gigantes.

Isaac Newton

## RESUMO

O nível do mar é objeto de estudo para muitos pesquisadores ao redor do mundo, para aplicações oceanográficas e geodésicas. Para aplicações geodésicas, o foco é o estabelecimento do referencial altimétrico. As medidas do nível da superfície do mar, anteriormente realizadas com marégrafos ao longo da costa continental e insular, passou a ter o auxílio de sensores altímetros orbitais a partir do início da década de 1990. Desde então várias missões de satélites altímetros radar e lidar foram lançadas. A partir dos dados dos sensores altímetros orbitais, tornou-se possível não só a medida da superfície da água nos mares e oceanos como também em corpos hídricos continentais como rios, lagos e lagoas. Como é possível medir a altura da superfície das águas interiores também é possível calcular os desníveis a partir do nivelamento hidrográfico orbital. Se o nível da superfície da água dos corpos hídricos é determinado por métodos geodésicos, em diferentes referenciais altimétricos, então existe a necessidade de integrá-los com precisão e confiabilidade por meio de metodologias que possam contribuir para a densificação da rede altimétrica brasileira, atendendo as normas vigentes no país como as especificações e normas para levantamento geodésico associado ao sistema geodésico brasileiro e NBR13133. A integração de referenciais verticais poderia ser realizada usando dados altimétricos orbitais em corpos hídricos continentais, agregando o nivelamento sobre a superfície da água aos métodos terrestres de nivelamento? Nesta pesquisa estão envolvidos os métodos terrestres de nivelamento geométrico e trigonométrico bem como o nivelamento hidrográfico orbital a partir do sensor lidar ATLAS embarcado no satélite ICESat-2, produto ATL08, que intercepta o Lago Guaíba, no estado do Rio Grande do Sul. Pelo nivelamento geométrico foram determinados os desníveis desde as referências de nível da rede altimétrica de alta precisão do sistema geodésico brasileiro e da rede de referência cadastral municipal do município de Porto Alegre até as referências de nível das estações linimétricas/linigráficas de Cais Mauá C6, Cristal, Ipanema e Terminal CatSul Guaíba, deixando-as sob o mesmo referencial altimétrico. Entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos e a superfície da água foi usado o nivelamento trigonométrico, usando estação total, pela técnica de Leap-Frog com medida sem prisma auxiliada por um dispositivo flutuador, que evita a penetração do sinal na água. Concomitante com o nivelamento trigonométrico foi observado o nível

da água nos linímetros/linígrafos para estabelecer uma relação entre os dois e determinar o ponto de referência ou “zero da régua”. Os desníveis entre as estações linimétricas/linigráficas foram determinadas a partir dos pontos sobre as trilhas ajustadas do ICESat-2. Na escolha do melhor ajustamento foi usado o critério de informação de Akaike para quatro graus do polinômio. Foi então comparado o nivelamento utilizando métodos terrestres com o nivelamento hidrográfico orbital, obtendo-se uma discrepância média geral, dentre quatro tipos de abordagem para o cálculo do desnível entre estações linimétricas/linigráficas sobre a superfície da água, de 0,0112 m e precisão média em função da distância de  $3,7 \text{ mm}\sqrt{k}$ . Desta forma, estabeleceu-se uma metodologia denominada de nivelamento híbrido para a integração de referenciais altimétricos.

**Palavras-chave:** Altimetria. Satélite. Geodésia.

## ABSTRACT

Sea level is the object of study for many researchers around the world, for oceanographic and geodetic applications. For geodetic applications, the focus is on establishing the altimetric reference. Sea surface level measurements, previously taken with tide gauges along continental and island coastlines, began to be aided by orbital altimeter sensors from the early 1990s. Since then, several radar and lidar altimeter satellite missions have been launched. Using data from orbital altimeter sensors, it has become possible not only to measure the water surface in seas and oceans, but also in continental water bodies such as rivers, lakes and lagoons. As it is possible to measure the height of the surface of inland waters, it is also possible to calculate level differences from orbital hydrographic leveling. If the water surface level of water bodies is determined by geodetic methods, in different altimetric references, then there is a need to integrate them accurately and reliably by means of methodologies that can contribute to the densification of the Brazilian altimetric network, complying with the standards in force in the country such as the specifications and standards for geodetic surveying associated with the Brazilian geodetic system and NBR13133. Could the integration of vertical references be carried out using orbital altimetry data in continental water bodies, adding leveling on the water surface to terrestrial leveling methods? This research involves the terrestrial methods of geometric and trigonometric leveling, as well as orbital hydrographic leveling using the lidar sensor ATLAS on board the ICESat-2 satellite, product ATL08, which intersects the Guaíba lake in the state of Rio Grande do Sul. By geometric leveling, the level differences was determined from the level references of the high-precision altimetric network of the Brazilian geodetic system and the municipal cadastral reference network of the municipality of Porto Alegre to the level references of the Cais Mauá C6, Cristal, Ipanema and Terminal CatSul Guaíba limnimeters stations, leaving them under the same altimetric reference. Trigonometric leveling was used between the level references of the limnimeters/limnigraphs and the water surface, using a total station and the Leap-Frog technique with measurement without a reflector, aided by a floating device, which prevents the signal from penetrating the water. At the same time as the trigonometric leveling, the water level in the limnimeters/limnigraphs was observed in order to establish a relationship between the two and determine the

reference point or "zero of the ruler". The level difference between the limnimeter/limnigraph stations were determined from the points on the adjusted ICESat-2 tracks. Akaike's information criterion for four degrees of the polynomial was used to choose the best adjustment. Leveling using terrestrial methods was then compared with orbital hydrographic leveling, obtaining an overall average discrepancy of 0.0112 m among the four types of approach for calculating the level difference between limnigraphic stations on the water surface and an average accuracy as a function of distance of  $3.7 \text{ mm}\sqrt{k}$ . In this way, a methodology called hybrid leveling was established for the integration of altimetric references.

**Keywords:** Altimetry. Satellite. Geodesy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Principais superfícies de interesse da geodésia e suas relações. ....	40
Figura 02 – Superfícies média (MSS/MDT), instantânea (SSH/ADT) e a relação entre as duas (SLA) referenciadas, respectivamente, ao elipsoide e ao geoide. ....	51
Figura 03 – Régua mareométrica.....	55
Figura 04 – Marégrafo/Linígrafo flutuante tipo boia e contrapeso analógico.....	56
Figura 05 – Marégrafo/Linígrafo acústico.....	57
Figura 06 – Princípio de funcionamento do sistema borbulhador.....	58
Figura 07 – Princípio de funcionamento do sistema com transdutor de pressão. ....	59
Figura 08 – Esquema do marégrafo/linígrafo por radar.....	60
Figura 09 – Princípio de funcionamento do GNSS-IR, a partir de radar inclinado (não nadiral). ....	61
Figura 10 – Diagramas do teste Van Castelee, onde (a) representa um marégrafo perfeito, (b) indica uma folga no mecanismo do medidor, (c) indica atrito mecânico no mecanismo do marégrafo ou da boia no tubo, (d) indica erro de escala por mau dimensionamento das engrenagens do registrador, do diâmetro do cabo da boia dentre outros, (e) indica erro de escala em parte do registro e (f) indica deslizamentos ou saltos no mecanismo.....	63
Figura 11 – Relações entre os desníveis com o teste Van de Castelee, onde é possível determinar o desnível entre o ponto de referência do sensor $l'$ e a referência de nível $i$ a partir do desnível entre os pontos $i$ e $k$ ( $\Delta H_{ik}$ ) e a leitura do nível da água realizada pelo sensor ( $\delta H_{ll}$ ).....	64
Figura 12 – Histórico das missões altimétricas orbitais, onde os polígonos representam o início e fim das missões (duração). Polígonos com seta à direita representam missões em prosseguimento até o período de coleta de dados ou a serem lançadas. ....	66
Figura 13 – Pulso radar e forma da onda, que indica o tipo de alvo e cujo reprocessamento dos dados busca aproximar os pontos da costa.....	67
Figura 14 – Princípios de determinação da Altitude do satélite, do alcance (distância sensor-superfície) e SSH. ....	70



Figura 15 – Princípio de operação do satélite Lidar altímetro multifeixe (ICESat-2).	72
Figura 16 – Princípio de aquisição de dados GNSS-R.....	73
Figura 17 – Princípio do nivelamento geométrico, onde o nível é estacionado entre os pontos k e l, e a diferença de nível ( $\delta n_{kl}$ ) é determinada por uma simples operação de subtração.....	76
Figura 18 – Nivelamento trigonométrico com medida indireta da distância a partir das leituras na mira (L) e medidas da distância zenital (Z) nos pontos j' e j''. .....	80
Figura 19 – Nivelamento trigonométrico com medida direta da distância a partir de um refletor (prisma) e medidas da distância zenital (Z) no ponto j'. .....	81
Figura 20 – Nivelamento trigonométrico com medida direta de distância usando a técnica <i>Leap-Frog</i> , onde a estação total fica estacionada entre os dois pontos a se determinar o desnível. ....	82
Figura 21 – Nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância (com leituras na mira) usando a técnica <i>Leap-Frog</i> . ....	83
Figura 22 – Sistema de nivelamento hidrostático básico de tubo único entre dois pontos às margens de um corpo hídrico. ....	84
Figura 23 – Sistema de nivelamento hidrostático fechado de tubo duplo entre dois pontos às margens de um corpo hídrico. ....	86
Figura 24 – Elementos do nivelamento hidrodinâmico, onde a diferença de nível sobre a superfície da água é a diferença de altitudes entre dois pontos, neste caso, altitudes ortométricas (referenciadas ao geoide). ....	87
Figura 25 – Exemplos de ajustamento linear (a) e não linear (b e c). ....	90
Figura 26 – Área de estudo com as estações linimétricas/linigráficas utilizadas na pesquisa. ....	102
Figura 27 – Pontos da RRCM (a) e RAAP (b) na área de estudos. ....	104
Figura 28 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento geométrico (a) e nivelamento trigonométrico (b) e seus acessórios. ....	105
Figura 29 – Linímetros/linígrafos utilizados no Cais Mauá C6 (a), em Terminal CatSul Guaíba (b), em Ipanema (c) e em Cristal (d).....	106
Figura 30 – Três versões do dispositivo flutuador e na extrema direita uma ilustração da próxima versão, com barreiras externas para minimizar os efeitos da oscilação da superfície da água. ....	107

Figura 31 – Satélites radares altímetros da série Jason e Sentinel-6 (a), Sentinel-3 (b) e Cryosat-2 (c) que interceptam o Lago Guaíba.....	109
Figura 32 – Conjunto de trilhas provenientes das passagens ICESat-2 que interceptam o Lago Guaíba, onde as diferentes cores representam as diversas passagens sobre o corpo hídrico. ....	111
Figura 33 – Alturas geoidais do MapGeo2015 no lago Guaíba.....	114
Figura 34 – Simulação de uso de métodos terrestres de nivelamento para a integração de referenciais altimétricos (nivelamento híbrido parcial). ..	116
Figura 35 – Perfil do nivelamento híbrido parcial usando métodos terrestres de nivelamento conjugando o nivelamento geométrico entre o referencial altimétrico e a referência de nível do linímetro/linígrafo, e o nivelamento trigonométrico entre a referência de nível do linímetro/linígrafo e a superfície da água.....	117
Figura 36 – Simulação de uso de métodos terrestres e hidrográfico de nivelamento para a integração de referenciais altimétricos (nivelamento híbrido completo).....	118
Figura 37 – Perfil do nivelamento híbrido completo usando métodos terrestres de nivelamento conjugando o nivelamento geométrico entre os referenciais altimétricos e as referências de nível dos linímetros/linígrafos, o nivelamento trigonométrico entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos e a superfície da água e o nivelamento hidrográfico orbital entre os linímetros/linígrafos.....	119
Figura 38 – Simulação de uso do nivelamento híbrido completo com lacuna próxima as margens, onde é necessária a criação de estações altimétricas virtuais (EAV). ....	121
Figura 39 – Perfil do nivelamento híbrido completo com lacuna próxima as margens (a) e desníveis totais (b). ....	121
Figura 40 – Localização das referências de nível utilizadas próximas às estações linimétricas/linigráficas e as linhas que as conecta. ....	123
Figura 41 – Linhas de nivelamento geométrico realizadas no Cais Mauá C6 (a), Terminal CatSul Guaíba (b), Cristal (c) e Ipanema (d), identificadas pela linha tracejada. ....	124
Figura 42 – Desenho esquemático dos nivelamentos geométricos executados em forma de rede, com nivelamento e contranivelamento executados de	

forma simultânea (a), com exceção do nivelamento geométrico realizado entre os pontos P1 e P2 (b), de forma tradicional com nivelamento e contranivelamento em épocas distintas. ....	125
Figura 43 – Elementos para o cálculo dos desníveis a partir do nivelamento geométrico.....	126
Figura 44 – Desenho esquemático para a montagem do ajustamento do nivelamento e contranivelamento (em épocas distintas). ....	127
Figura 45 – Desenho esquemático para a montagem do ajustamento do nivelamento e contranivelamento (medidas simultâneas) pelo método dos correlatos. ....	128
Figura 46 – Conexões terra-água/água-terra no Cais Mauá C6 (a), Cristal (b), Ipanema (c) e Terminal CatSul Guaíba (d). ....	133
Figura 47 – Princípio do método de conexão terra-água/água-terra a partir do nivelamento trigonométrico com linígrafos automáticos telemétricos...	134
Figura 48 – Medida da superfície da água com dispositivo flutuador, protegido entre a vegetação para evitar as ondulações da superfície da água devido aos ventos.....	135
Figura 49 – Princípio do método de conexão terra-água/água-terra a partir do nivelamento trigonométrico com régua linimétrica.....	138
Figura 50 – Nivelamento trigonométrico usando o dispositivo flutuador, sua evolução durante as campanhas de levantamento (a, b, c) e projeção de novo protótipo com proteção contra as ondulações da superfície da água (d). ....	139
Figura 51 – Desníveis determinados a partir do nivelamento trigonométrico com medida indireta da distância à vante (a) e medida direta de distância à vante (b). Ambos usam nivelamento trigonométrico com medida direta de distância à ré.....	140
Figura 52 – Campanhas de levantamento executados em Ipanema (a), onde foram realizadas as medidas diretamente na régua linimétrica e Guaíba (b), onde foi usado o dispositivo flutuador. ....	142
Figura 53 – Distribuição dos pontos Sentinel-3A, Sentinel-3B e Jason-3 (a) e Cryosat-2 (b) no complexo Guaíba/Patos. Para o Cryosat-2 as cores indicam cada passagem do satélite sobre o complexo Guaíba/Patos.	143

Figura 54 – Distribuição dos pontos ICESat-2 ATL08 (a) e ATL13 (b), mostrando a lacuna no interior da Lagoa dos Patos (b) devido à um equívoco na avaliação e uso de máscara para o corpo hídrico, que foi considerado como costa oceânica.....	144
Figura 55 – Trilhas usadas para a comparação entre os produtos ATL08 e ATL13, com as cores das trilhas indicando cada lado para cada passagem....	145
Figura 56 – Localização das trilhas em relação aos linímetros/linígrafos, com a faixa 757 inclinada para leste e a faixa 551 inclinada para oeste (orientação ascendente). As cores representam as diversas passagens do ICESat-2 pela área de estudo.....	146
Figura 57 – Conjunto de trilhas para as faixas 551 e 993 (a), 757 e 1199 (b) que interceptam o Lago Guaíba. ....	147
Figura 58 – Sobreposição de trilhas e passagens do satélite ICESat-2, favorecendo a cobertura espacial no Lago Guaíba. ....	148
Figura 59 – Identificação dos conjuntos de trilhas para as faixas 551 (a) e 757 (b) na área de estudo. As cores indicam as passagens do satélite sobre a área de estudo.....	149
Figura 60 – Perfil do nivelamento hidrográfico orbital tipo-1. ....	151
Figura 61 – Exemplo de desníveis entre conjuntos de trilhas diferentes (a) e mesmo conjunto de trilhas (b), desde que pareadas (mesma época).....	152
Figura 62 – Perfil do nivelamento hidrográfico orbital tipo-4. ....	152
Figura 63 – Exemplo de interpolação de valores entre trilhas adjacentes na estação de Ipanema, que devem ser da mesma época. As cores indicam cada passagem do satélite em cada época. ....	153
Figura 64 – Perfil mostrando o desnível entre faixas e trilhas de épocas distintas em ponto de cruzamento.....	154
Figura 65 – Exemplo de conexão com cruzamento entre faixas e trilhas em épocas diferentes. As cores indicam cada passagem do satélite em cada época. ....	155
Figura 66 – Circuito de nivelamento híbrido completo para a avaliação dos resultados do nivelamento hidrográfico orbital. ....	157
Figura 67 – Conexões terra-água/água-terra para as abordagens tipo-1 e tipo-2 (a), tipo-2 e tipo-3 (b) e tipo-4 (c) do nivelamento hidrográfico orbital. ....	158

Figura 68 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 26/10/2018. .165	165
Figura 69 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 20/04/2023. .165	165
Figura 70 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 17/04/2023. .168	168
Figura 71 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 18/04/2023. .168	168
Figura 72 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 19/04/2023. .168	168
Figura 73 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 09/06/2023. .169	169
Figura 74 – RN1 em Ipanema com dois registros de desnível em relação ao “zero da régua” ..... 170	170
Figura 75 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em Guaíba. .... 171	171
Figura 76 – Pontos válidos das trilhas dos satélites radar altímetros das missões Jason, Sentinel-3 e Cryosat-2 (a) e zona útil (b). ..... 173	173
Figura 77 – Exemplos de comportamento das trilhas Sentinel-3A sobre o Lago Guaíba em 17/03/2017 (a), 26/04/2018 (b), 30/07/2017 (c) e 03/02/2020 (d)..... 174	174
Figura 78 – Exemplos de comportamento das trilhas sobre o Lago Guaíba das missões Jason-1 em 03/03/2005 (a), Jason-2 em 31/07/2012 (b), Jason-3 em 05/02/2019 (c) e Sentinel-6A no modo LRM em 10/02/2022 (d). 174	174
Figura 79 – Exemplos de comportamento das trilhas sobre o Lago Guaíba da missão Sentinel-6A no modo SAR em 31/01/2022 (a) e 18/07/2022 (b). ..... 175	175
Figura 80 – Exemplos de comportamento das trilhas Cryosat-2 sobre o Lago Guaíba em 06/06/2016 (a), 14/11/2013 (b), 23/03/2019 (c) e 06/05/2015 (d)... 175	175
Figura 81 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT1R (a) e GT1L (b) da faixa 551..... 176	176
Figura 82 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT3R (a) e GT3L (b) da faixa 1199..... 177	177
Figura 83 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT2R (a) e GT2L (b) da faixa 757..... 177	177

Figura 84 – Exemplos de linha de tendência linear (a) e intervalo de confiança dos resíduos (b), onde os valores fora do intervalo são rejeitados. ....	179
Figura 85 – Exemplo de gráfico com os dados originais e ajustados por meio de quatro graus do polinômio. ....	180
Figura 86 – Exemplo de gráfico de melhor ajuste sobre os dados originais. ....	180
Figura 87 – Conjuntos de trilhas ajustadas para as faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b), onde cada cor representa um conjunto. ....	182
Figura 88 – Conjunto de trilhas ajustadas médias espaciais para as faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b), onde cada cor representa um conjunto. ....	182
Figura 89 – Conjunto de trilhas ajustadas médias temporais para as faixas 551/993 e trilha 757/1199, onde cada cor representa um conjunto. ....	183
Figura 90 – Gráfico exemplo de médias espaciais do conjunto-3 de trilhas e média temporal. ....	183
Figura 91 – Exemplo de trilhas individuais ajustadas (a) e médias espaciais (b) em Cristal. ....	184
Figura 92 – Gráficos de dispersão para os desníveis Cais Mauá C6-Ipanema (a), Cristal-Ipanema (b) e Ipanema-Terminal CatSul Guaíba (c). ....	196
Figura 93 – Discrepâncias entre as observações dos linígrafos Terminal CatSul Guaíba e Cais Mauá C6. ....	208
Figura 94 – Discrepâncias entre as observações dos linígrafos Cristal e Cais Mauá C6. ....	209

## LISTA DE QUADROS

Quadro 01 – Siglas aplicadas às variáveis referentes à superfície da água média, instantânea e diferença entre as duas, proposta por Gregory et al. (2019) e adotada na pesquisa.....	51
Quadro 02 – Símbolos aplicados às variáveis referentes à superfície da água proposto por Gregory et al. (2019) e adotado na pesquisa. ....	52
Quadro 03 – Controle de qualidade para o nivelamento geométrico geodésico a partir das especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro. ....	98
Quadro 04 – Especificações para o nivelamento geométrico com fins topográficos segundo a NBR13.133:1994. ....	99
Quadro 05 – Especificações para o nivelamento geométrico com fins topográficos segundo a NBR13.133:2021. ....	100
Quadro 06 – Referências de nível utilizadas, onde Rede é a origem (RAAP ou RRCM), H são as altitudes normal-ortométricas e $\sigma$ é o desvio padrão. ....	104
Quadro 07 – Características dos satélites radares altímetros mostrando as missões/sensores, data do lançamento, faixa de frequência (bandas), modo de operação e duração do ciclo (revisita).....	108
Quadro 08 – Datas, horário de início, fim e duração das campanhas de levantamento da superfície da água em Cristal.....	137
Quadro 09 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Cais Mauá C6. ....	155
Quadro 10 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Cristal.....	156
Quadro 11 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Ipanema.....	156
Quadro 12 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Terminal CatSul Guaíba. ....	156
Quadro 13 – Época e trilhas ICESat-2 na transição entre as faixas 551 e 757.....	156
Quadro 14 – Resultados do teste chi-quadrado antes da mudança de critério de pesos para os ajustamentos rejeitados. ....	161
Quadro 15 – Resultados do teste chi-quadrado após a mudança de critério de pesos para os ajustamentos rejeitados. ....	161
Quadro 16 – Resultados dos nivelamentos geométricos. ....	162

Quadro 17 – Resultado da passagem do nivelamento geométrico pelo ponto P0617. .....	163
Quadro 18 – Desníveis e desvios padrão entre referências de nível de outras redes. .....	163
Quadro 19 – Desníveis entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos. ....	163
Quadro 20 – Desnível entre a referência de nível do linígrafo Cais Mauá C6, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra) no SPH. .....	166
Quadro 21 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Cristal, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra). ....	166
Quadro 22 – Comparação do desnível temporal da superfície da água em Cristal entre o nivelamento trigonométrico e as observações do linímetro. ..	167
Quadro 23 – Comparação entre as observações em Cristal e em Cais Mauá C6. .	167
Quadro 24 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Ipanema, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra). ....	169
Quadro 25 – Comparação entre as observações em Ipanema e em Cais Mauá C6. .....	170
Quadro 26 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Terminal CatSul Guaíba, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra).....	171
Quadro 27 – Comparação entre as observações nos linígrafos Terminal CatSul Guaíba e Cais Mauá C6. ....	172
Quadro 28 – Elementos e resultados do teste estatístico t de student. ....	177
Quadro 29 – Exemplo de valores para o Critério de Informação Akaike (AIC). ....	179
Quadro 30 – Número e porcentagem de trilhas ajustadas pelo grau do polinômio.	181
Quadro 31 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Cais Mauá C6 e Cristal.	184
Quadro 32 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Cristal. .....	185
Quadro 33 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Ipanema. ....	186
Quadro 34 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Ipanema (pontos mais próximos). ....	186
Quadro 35 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Ipanema (pontos interpolados). ....	187



Quadro 36 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Terminal CatSul Guaíba. .....	187
Quadro 37 – Datas e trilhas da passagem do satélite em T-551 e T-757. ....	188
Quadro 38 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e T-551. .....	188
Quadro 39 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-551 e T-757. ....	189
Quadro 40 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-757 e Terminal CatSul Guaíba. ....	189
Quadro 41 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba. ....	189
Quadro 42 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Ipanema para os pontos próximos à Ipanema. ....	190
Quadro 43 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Ipanema para os pontos interpolados. ....	190
Quadro 44 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e T-551. ....	191
Quadro 45 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-551 e T-757. ....	191
Quadro 46 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba. ....	192
Quadro 47 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e T-757A. ....	192
Quadro 48 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-757A e T-757B. ....	193
Quadro 49 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba usando exclusivamente a faixa 757. ....	193
Quadro 50 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e T-551 a partir dos pontos mais próximos. ....	194
Quadro 51 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e T-551 a partir dos pontos interpolados. ....	194
Quadro 52 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba com pontos próximos à Ipanema. ....	195
Quadro 53 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba com pontos interpolados. ....	195
Quadro 54 – Parâmetros e resultados do teste t de student para avaliação dos métodos de pontos mais próximos à estação Ipanema e pontos interpolados. ....	196

Quadro 55 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média completa.....	197
Quadro 56 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média parcial.....	198
Quadro 57 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média completa e medidas da superfície da água no Cais Mauá C6 em 26/10/2018. ....	198
Quadro 58 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos mais próximos. ....	199
Quadro 59 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos interpolados. ....	199
Quadro 60 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital. ....	200
Quadro 61 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos mais próximos à Ipanema e média completa. ....	201
Quadro 62 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos mais próximos à Ipanema e média parcial. ....	201
Quadro 63 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos interpolados e média completa.....	202
Quadro 64 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos interpolados e média parcial.....	202
Quadro 65 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 551 até o ponto de transição e média completa. ....	203

Quadro 66 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 551 até o ponto de transição e média parcial. ....	203
Quadro 67 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 757 até o ponto de transição e média completa. ....	204
Quadro 68 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 757 até o ponto de transição e média parcial. ....	204
Quadro 69 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Ipanema (RN1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos mais próximos à Ipanema.....	205
Quadro 70 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Ipanema (RN1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos interpolados. ....	205
Quadro 71 – Discrepâncias e incertezas médias por abordagem. ....	206
Quadro 72 – Melhores resultados da avaliação do fechamento para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital.....	206
Quadro 73 – Resultados da avaliação do fechamento médio no pior caso para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital. ....	207
Quadro 74 – Resultados da avaliação do fechamento médio geral para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital. ....	207

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADT	Absolute Dynamic Topography
AIC	Akaike Information Criterion
ANA	Agência Nacional de Águas
ATLAS	Advanced Topographic Laser Altimeter System
ATM	Airborne Topographic Mapper
ATSM	Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar
AVISO	Archiving Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data
BDCS	Beidou Coordinate System
BGI	Bureau Gravimétrique International
CGLS	Copernicus Global Land Service
CLS	Collecte Localisation Satellite
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CPRM	Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais
CS	Continuity of Service
CTOH	Centre de Topographie des Océans et l'Hydrosphère
CYGNSS	Cyclone Global Navigation Satellite System
DAHITI	Database for Hydrological Time Series of Inland Waters
DCN	Datum da Carta Náutica
DGFI	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut
DInSAR	Differential InSAR
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DOT	Dynamic Ocean Topography
DT	Dynamic Topography
DTU	Danmarks Tekniske Universitet
DVL	Datum Vertical Local
EAV	Estação Altimétrica Virtual
ENOS	El Niño Oscilação Sul
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EQM	Erro Quadrático Médio
EUMETSAT	European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellite

FFSSCAT	The Federated Satellite System Cube Sat
FFT	Fast Fourier Transform
FOV	Field Of View
GDR	Geophysical Data Record
GFO	Geosat Follow On
GGM	Geopotential Global Model
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GNSS-R	Global Navigation Satellite System Reflectometry
GNSS-IR	Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry
GNSS-MR	Global Navigation Satellite System Multipath Reflectometry
GNSS-IPT	Global Navigation Satellite System Interference Pattern Technique
GOCE	Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
GPS	Global Positioning System
GRACE	Gravity Recovery and Climate Experiment
GRS	Global Reference System
GSFC	Goddard Space Flight Center
GT	Ground Track
GTRF	Galileo Terrestrial Reference Frame
IAG	International Association of Geodesy
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICESAT	Ice, Cloud and Land Elevation Satellite
IERS	International Earth Rotation Service
IGDR	Interim Geophysical Data Record
IHRF	International Height Reference Frame
IHRS	International Height Reference System
INSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
IOC	Intergovernmental Oceanographic Commission
ISO	International Organization for Standardization
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
ITRS	International Terrestrial Reference System
K-L	Kullback-Leibler
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LAT	Lowest Astronomical Tide

LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales
LIDAR	Light Detection and Ranging
LMCS	Land Monitoring Core Service
LRM	Low Resolution Model
MDT	Mean Dynamic Topography
MDOT	Mean Dynamic Ocean Topography
MFV	Máximo da Função de Verossimilhança
MLE	Maximum Likelihood Estimator
MLWS	Mean Low Water Springs
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
MSL	Mean Sea Level
MSS	Mean Sea Surface
MWL	Mean Water Level
MWS	Mean Water Surface
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation System Using Time and Ranging
NBR	Normas Brasileiras
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NNSS	Navy Navigation Satellite System
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRT	Near Real-Time
NTC	Non-Time Critical
OCOG	Offset Center of Gravity
ODT	Ocean Dynamic Topography
ODSL	Ocean Dynamic Sea Level
OGDR	Operational Geophysical Data Record
OHI	Organização Hidrográfica Internacional
PMPA	Prefeitura Municipal de Porto Alegre
PPM	Parte Por Milhão
PRETTY	Passive Reflectometry and Dosimetry
PSInSAR™	Persistent Scatter Interferometric Synthetic Aperture Radar
PZ90	Parametry Zimli 1990
RAAP	Rede Altimétrica de Alta Precisão
RADAR	Radio Detection and Ranging

RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RLPPG	Rede Linigráfica Permanente Para a Geodésia
RMPPG	Rede Maregráfica Permanente Para a Geodésia
RMSE	Root Mean Square Error
RN	Referência de Nível
RNA	Redes Neurais Artificiais
RRCM	Rede de Referência Cadastral Municipal
RRNN	Referências de Nível
RTK	Real Time Kinematic
SAMOSA	SAR Altimetry Mode Studies and Applications
SAR	Synthetic Aperture Radar
SARIn	Synthetic Aperture Radar Interferometry
SAT	Satélite
SCR	Sistema Cartográfico de Referência
SDT	Sea Dynamic Topography
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
SGR	Sistema Geodésico de Referência
SIRAL	Sar Interferometer Radar Altimeter
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SLA	Sea Level Anomaly
SLC-SAR	Single Look Complex – Synthetic Aperture Radar
SMDT	Sea Mean Dynamic Topography
SNOOPI	Signals of Opportunity P-Band Investigation
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPH	Superintendência de Portos e Hidrovias
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSH	Sea Surface Height
SSHA	Sea Surface Height Anomaly
SST	Sea Surface Topography
STC	Slow-Time Critical
SWOT	Surface Water Ocean Topography
TDS	Technology Demonstration Satellite
TNMM	Topografia do Nível Médio do Mar

TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TUM	Technische Universität München
UKDMC	United Kingdom Destination Management Company
UKSSTL	United Kingdom Survey Satellite Technology Ltd
UNB	Universidade de New Brunswick
UPC	Universidade Politécnica da Catalunha
WGS	World Geodetic System
WLA	Water Level Anomaly
WSH	Water Surface Height



## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$	Número geopotencial
$W$	Geopotencial
$U$	Esferopotencial
$W_0$	Geopotencial de referência
$\zeta$	Anomalia de altura
$W_{0(i)}$	Geopotencial de referência local
$H^N$	Altitude normal em relação ao quase-geoide
$H^{NL}$	Altitude normal em relação ao datum vertical local
$H$	Altitude ortométrica
$h$	Altitude elipsoidal
$N$	Altura geoidal
$\eta$	Fator de conversão de altitude elipsoidal em altitude normal em relação ao datum vertical local
$X_0, Y_0, Z_0$	Coordenadas geodésicas cartesianas geocêntricas na origem do sistema
$X, Y, Z$	Coordenadas geodésicas cartesianas geocêntricas
$H_0$	Altitude ortométrica na origem do sistema de coordenadas
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	Parâmetros de translação
$R_X, R_Y, R_Z$	Parâmetros de rotação
$D$	Parâmetro de escala
$N_{\text{Map}}$	Altura geoidal do MapGeo2015
$\delta h^{\text{SLA}}$	Anomalia da superfície do mar em relação ao elipsoide
$\delta H^{\text{SLA}}$	Anomalia da superfície do mar em relação ao geoide
$h^{\text{SSH}}$	Altitude da superfície do mar sobre o elipsoide
$H^{\text{ADT}}$	Altitude da topografia dinâmica absoluta sobre o geoide
$h^{\text{MSS}}$	Altitude do nível médio do mar sobre o elipsoide
$H^{\text{MDT}}$	Altitude da topografia dinâmica média sobre o geoide
$P_m$	Pressão manométrica

$P_a$	Pressão atmosférica
$\rho$	Densidade
$g$	Aceleração da gravidade
$\Delta H$	Diferença de nível em pontos distintos a partir das altitudes ortométricas
$\delta H$	Diferença de nível em um mesmo ponto a partir das altitudes ortométricas
$R$	Distância satélite-superfície
$\Delta t$	Tempo de transmissão e recepção do sinal
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$h^{\text{SAT}}$	Altitude do sensor altímetro em relação ao elipsóide
$C_o$	Correções para o sinal dos sensores altímetros orbitais
$\Delta H^{\text{RN}}$	Diferença de nível proveniente do nivelamento geométrico
$\Delta n$	Diferença de nível proveniente do nivelamento geométrico (TORGE, 2001)
$\delta n$	Diferença de nível parcial para uma linha de nivelamento geométrico (TORGE, 2001)
$w$	Pesos
$\Delta H^{\text{RNC}}$	Diferença de nível proveniente do nivelamento geométrico com correções de ordem gravimétrica
$R^2$	Coefficiente de determinação
$Z$	Distância zenital (ângulo vertical em relação ao zênite)
$L$	Leituras na mira
$\Delta D^h$	Distância horizontal
$\Delta D^i$	Distância inclinada
$k$	Coefficiente de refração
$R_T$	Raio da Terra
$Z^{\text{PD}}$	Distância zenital na posição direta
$Z^{\text{PI}}$	Distância zenital na posição inversa
$\Delta H^{\text{MDT}}$	Diferença de nível sobre a superfície média dinâmica da água
$\nabla \Delta H$	Discrepância entre diferenças de nível
$\Delta \delta H^{\text{SLA}}$	Discrepância das anomalias de altura entre dois pontos sobre a superfície absoluta da água

$\Delta\delta H^{ADT}$	Discrepância das diferenças de nível entre dois pontos sobre a superfície absoluta da água
$\Delta\delta H^{MDT}$	Discrepância das diferenças de nível entre dois pontos sobre a superfície média da água
$\nabla\Delta\bar{H}^W$	Discrepância das diferenças de nível sobre a superfície da água (GREGORY et al., 2019)
$\Delta\bar{H}^W$	Diferença de nível sobre a superfície da água (GREGORY et al., 2019)
$C_H$	Compensação parcial da diferença de nível (SEGANTINE; SILVA, 2015)
$n$	Número de observações
$d$	Distância aproximada (SEGANTINE; SILVA, 2015)
$A$	Matriz das derivadas parciais dos parâmetros
$P$	Matriz dos pesos
$L_{obs}$	Vetor dos valores observados
$X_a$	Vetor dos parâmetros ajustados
$X_0$	Vetor dos parâmetros aproximados
$\sigma_0^2$	Variância a priori
$\hat{\sigma}_0^2$	Variância a posteriori
$K$	Vetor dos multiplicadores de Lagrange
$B$	Matriz das derivadas parciais das observações
$W$	Vetor dos erros de fechamento
$V$	Vetor dos resíduos
$L_a$	Vetor das leituras ajustadas
$L_b$	Vetor das leituras brutas
$I$	Matriz identidade
$M$	Matriz normal
$\Sigma X_a$	Matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados
$\Sigma L_a$	Matriz variância-covariância das leituras ajustadas
$S, r$	Número de equações de condição ou observações superabundantes
$\chi^2$	Valor qui-quadrado
$t$	Valor t de student
$\sigma$	Desvio padrão populacional
$s$	Desvio padrão amostral

$\mu$	Média aritmética populacional
$\bar{x}$	Média aritmética amostral
$\sigma_{\text{média}}$	Erro padrão
u	número de incógnitas
$\Delta H^{HI(t)}$	Diferença de nível ortométrica no nivelamento híbrido parcial
$\Delta H^{RN'(t)}$	Diferença de nível ortométrica proveniente do nivelamento trigonométrico entre a RN do linímetro/linígrafo e a superfície da água em uma época t
$\delta H^L(t)$	Observação do linímetro/linígrafo em uma época t
$\Delta H^{RN(t)}$	Diferença de nível ortométrica proveniente do nivelamento geométrico e trigonométrico entre a RN de referência principal e a superfície da água em uma época t
$\Delta H^{W(t)}$	Diferença de nível ortométrica sobre a superfície da água em uma época t
$H^{W(t)}$	Altitude ortométrica da superfície da água em uma época t
$\Delta H^{HIB}$	Diferença de nível ortométrica no nivelamento híbrido completo
$\Delta H^D$	Diferença de nível ortométrica compensada em função das distâncias
$\Delta H^C$	Diferença de nível ortométrica ajustada pelo método dos correlatos
$\Delta H^P$	Diferença de nível ortométrica ajustada pelo método dos parâmetros
$\sigma^C$	Desvio padrão para o método dos correlatos
$\sigma^P$	Desvio padrão para o método paramétrico

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>33</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Superfícies geodésicas</b> .....	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Referenciais geodésicos</b> .....	<b>41</b>
<b>2.3</b>	<b>Outros níveis de referência</b> .....	<b>44</b>
<b>2.4</b>	<b>O sistema geodésico brasileiro (SGB)</b> .....	<b>45</b>
2.4.1	<i>Rede planimétrica</i> .....	45
2.4.2	<i>Rede altimétrica</i> .....	46
2.4.3	<i>Rede gravimétrica</i> .....	47
<b>2.5</b>	<b>Superfície do nível da água</b> .....	<b>48</b>
<b>2.6</b>	<b>Métodos de observação do nível da água a partir de estações de superfície</b> .....	<b>54</b>
2.6.1	<i>Teste Van de Casteele para a avaliação e calibração de marégrafos/linígrafos</i> .....	62
<b>2.7</b>	<b>Métodos de observação do nível da água a partir de sensores orbitais</b> .....	<b>64</b>
<b>2.8</b>	<b>Métodos terrestres de nivelamento</b> .....	<b>75</b>
2.8.1	<i>O nivelamento geométrico</i> .....	76
2.8.2	<i>O nivelamento trigonométrico</i> .....	79
<b>2.9</b>	<b>Métodos hidrográficos de nivelamento</b> .....	<b>84</b>
2.9.1	<i>O nivelamento hidrostático</i> .....	84
2.9.2	<i>O nivelamento hidrodinâmico</i> .....	86
<b>2.10</b>	<b>Ajustamento das observações</b> .....	<b>89</b>
2.10.1	<i>Ajustamento de curvas pelo método dos mínimos quadrados</i> .....	89
2.10.2	<i>O critério de informação de Akaike</i> .....	91
2.10.3	<i>Ajustamento do nivelamento geométrico</i> .....	91
<b>2.11</b>	<b>Parâmetros de análise e avaliação dos resultados</b> .....	<b>94</b>
2.11.1	<i>Incerteza</i> .....	95
2.11.2	<i>Testes estatísticos</i> .....	96
2.11.3	<i>Avaliação a partir das normas</i> .....	97
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>101</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	<b>101</b>
<b>3.2</b>	<b>Materiais utilizados</b> .....	<b>103</b>
<b>3.3</b>	<b>Nivelamento híbrido terrestre e hidrográfico orbital</b> .....	<b>114</b>

3.3.1	<i>Conexão terra-terra via nivelamento geométrico .....</i>	122
3.3.2	<i>Conexão terra-água/água-terra via nivelamento trigonométrico .....</i>	132
3.3.3	<i>Conexão água-água via nivelamento hidrográfico orbital.....</i>	142
3.3.4	<i>Avaliação do nivelamento hidrográfico orbital.....</i>	157
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	161
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	211
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	219
	<b>APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DO DISPOSITIVO FLUTUADOR</b> <b>.....</b>	233
	<b>ANEXO A – LISTA DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RAAP EM</b> <b>PORTO ALEGRE.....</b>	234
	<b>ANEXO B – LISTA DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RAAP EM</b> <b>GUAÍBA .....</b>	237
	<b>ANEXO C – MONOGRAFIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA</b> <b>RAAP USADAS.....</b>	238
	<b>ANEXO D – MONOGRAFIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA</b> <b>RRCM USADAS .....</b>	240
	<b>ANEXO E – RELATÓRIO DOS LINÍMETROS/LINÍGRAFOS USADOS</b> <b>.....</b>	243

## 1 INTRODUÇÃO

O nível da superfície do mar é objeto de estudo de muitos pesquisadores ao redor do mundo, para aplicações oceanográficas e geodésicas. Para a geodésia o foco principal é a determinação de referenciais verticais e, atualmente, a unificação destes referenciais, geralmente materializados por marégrafos situados na costa oceânica. Pelo menos três métodos para a unificação de referenciais verticais podem ser utilizados, dois diretos e um indireto (RUMMEL, 2002).

O método indireto aborda o problema do valor de contorno da geodésia, podendo se beneficiar dos modelos globais do geopotencial (GGM) determinados a partir das missões *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e *Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer* (GOCE), (FILMER et al., 2018), mas a insuficiência e a qualidade dos dados pode ser um fator limitante para seu uso.

Os métodos diretos são o nivelamento sobre a terra (taqueométrico, trigonométrico e geométrico) e o nivelamento hidrodinâmico. O nivelamento geométrico permite integrar referenciais verticais por meio de levantamentos sobre a terra. A rede altimétrica materializada usando este método é representada, no Brasil, pela rede altimétrica de alta precisão (RAAP) do sistema geodésico brasileiro (SGB). A RAAP reveste-se de grande importância pois permite integrar as referências de nível de quase todo o território nacional além de poder conectar quase todos os marégrafos da costa brasileira. Os desníveis determinados na rede em conjunto com os valores da gravidade permitem a propagação do número geopotencial ( $C$ ) a partir dos referenciais altimétricos com o potencial de gravidade ( $W$ ) conhecidos. Além disso, a RAAP permite conectar projetos e obras a um mesmo sistema altimétrico. A importância da RAAP também traduz a importância de outras redes altimétricas regionais/nacionais pelo mundo.

Porém, o nivelamento geométrico não permite integrar referenciais verticais separados pelo oceano e outros grandes corpos hídricos e este problema pode ser observado no Brasil. Devido a impossibilidade de cruzar o Rio Amazonas por meio do nivelamento geométrico, na região do estado do Amapá é utilizado o nível médio do mar obtido no marégrafo do porto de Santana como *Datum* altimétrico e a rede altimétrica está isolada do resto do território nacional, tendo o Brasil então dois referenciais: Imbituba - SC e Santana - AP. Em outras partes do mundo também

ocorrem problemas similares, onde as redes altimétricas continentais e insulares não são conectadas, possuindo referenciais altimétricos distintos e cuja integração é possível apenas a partir da superfície da água, como é o caso das ilhas Wadden nos Países Baixos (SLOBBE et al., 2018).

Como há a necessidade de que as referências verticais estejam no mesmo sistema de altitudes, um meio de integração quando estão separados por grandes corpos hídricos pode ser o nivelamento hidrodinâmico. Para que seja possível efetuar o nivelamento hidrodinâmico é necessário o conhecimento da topografia dinâmica da superfície da água em relação ao geóide. A superfície pode ser média, conhecida como *mean dynamic topography* (MDT), determinada a partir da observação da topografia dinâmica absoluta ou *absolute dynamic topography* (ADT) por um determinado período de tempo, ou seja, enquanto a ADT é a medida instantânea da superfície do nível da água, a MDT é o valor médio da ADT.

A superfície do nível da água pode ser determinada a partir de uma abordagem oceanográfica onde são utilizados modelos de circulação oceânica (ANDERSEN et al., 2018) e observações *in situ* (KARIMI; ANDERSEN; DENG, 2021), de uma abordagem geodésica a partir dos satélites altímetros, observação dos marégrafos ou boias GNSS (ANDERSEN et al., 2018; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020; SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014) ou uma combinação usando as duas abordagens, oceanográfica/geodésica (FILMER et al., 2018).

Pela abordagem geodésica, a partir dos satélites altímetros, obtém-se medidas instantâneas que geram valores médios referenciadas ao elipsoide, que são denominados altura do nível do mar ou *sea surface height* (SSH), para medidas instantâneas, e superfície média do mar ou *mean sea Surface* (MSS) para a superfície média. Desta forma, para se obter a ADT e a MDT a partir da SSH e MSS deve-se usar um modelo geoidal.

Quanto a altimetria baseada em sensores orbitais, apesar das incertezas e da baixa resolução temporal, pode ser considerada uma técnica madura de observação da SSH, com acurácia centimétrica (IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2017). Recentes estudos demonstram a aplicabilidade dos dados dos satélites altímetros na determinação do MDT de forma acurada (HUANG, 2017).



Os marégrafos, para servirem ao propósito da determinação da superfície da água de forma acurada, devem estar conectados à uma referência vertical fixa em terra para que as leituras possam ser convertidas em desníveis ou altitudes. A conexão pode se dar de forma absoluta, por meio do rastreamento dos sinais dos satélites do *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), com altitudes elipsoidais convertidas para altitudes como as ortométricas, a partir de um modelo geoidal por exemplo. A conexão também pode ser realizada de forma relativa a partir do nivelamento terrestre (geométrico ou trigonométrico).

Para gerar MDTs consistentes, recomenda-se dez anos ou mais de observações do nível da água (SLOBBE et al., 2018). Marégrafos sujeitos aos efeitos baroclínicos (estratificação), como a descarga de rios, podem ser excluídos (AFRASTEH et al., 2021; SLOBBE et al., 2018)

Os conceitos aplicados à costa oceânica talvez possam ser adaptados aos corpos hídricos continentais como lagos e lagoas. Corpos hídricos continentais endorreicos dependem do volume de água que entra, como a precipitação e fluxo dos rios, e do que sai, como a evaporação e consumo (CRÉTAUX; BIRKETT, 2006). Corpos hídricos litorâneos, com ligação ao mar, também sofrem influências deste até certo ponto, como as marés oceânicas por exemplo. A ação das forçantes tem menor impacto nos lagos e lagoas do que no mar costeiro e oceano aberto, portanto, pode-se considerar estes corpos hídricos como mais estáveis, com potencial para servirem de objeto para a unificação de referenciais verticais.

Além do tradicional método de observação do nível da água por linímetros/linígrafos (marégrafos aplicados à observação do nível em outros corpos de água), o nível da água em lagos e rios tem sido obtido com sucesso a partir de diferentes missões de satélites radares altímetros (LI et al., 2018). Os resultados têm mantido boa concordância com dados medidos *in loco* (BERRY et al., 2005). Esta situação é demonstrada nos trabalhos de monitoramento dos lagos no planalto tibetano (JIANG et al., 2019; KLEINHERENBRINK; LINDENBERGH; DITMAR, 2015). Pesquisas realizadas com as missões de satélites LIDAR altímetros também têm se mostrado viáveis, como o trabalho pioneiro no uso de dados orbitais para o nivelamento de estações fluviométricas na Amazônia, onde utilizou-se dados ICESat-1 com suporte de um modelo hidrodinâmico para referenciar réguas linimétricas a um mesmo sistema de referência altimétrica (HALL et al., 2012) e o trabalho que mostra

a potencialidade de aplicação do cálculo de declividades de rios para auxílio no nivelamento hidrodinâmico com dados ICESat-2 (SCHERER et al., 2023).

Se o nível da superfície da água dos corpos hídricos é determinado por métodos geodésicos, em diferentes referenciais altimétricos (principalmente quanto aos linímetros/linígrafos), há a necessidade de integrá-los com precisão e confiabilidade usando metodologias que buscam contribuir com a densificação da rede altimétrica brasileira, atendendo as especificações e normas vigentes no país. Um referencial altimétrico único também permite a manutenção da infraestrutura, além da sua reconstrução em caso de dano, sem comprometer a qualidade da série histórica dos dados. A integração de referenciais verticais poderia ser realizada a partir de dados altimétricos orbitais em corpos hídricos continentais, agregando o nivelamento sobre a superfície da água aos métodos terrestres de nivelamento?

Nesta pesquisa integrou-se os métodos terrestres de nivelamento geométrico e trigonométrico ao nivelamento hidrodinâmico (aqui denominado de hidrográfico orbital por se valer de dados de sensores altímetros orbitais aplicados em corpos de água continentais), a partir de sensores altímetros orbitais. Desta forma é possível estabelecer a metodologia denominada nivelamento híbrido, que visa a integração de referenciais altimétricos, já que os corpos hídricos podem constituir um impedimento para o nivelamento geométrico. Em alguns casos, há a possibilidade de minimizar erros sistemáticos na densificação de redes altimétricas pois, ao invés de contornar o corpo de água com o nivelamento geométrico por via terrestre, pode-se usar a superfície do corpo hídrico. Outra possibilidade é integrar redes altimétricas a partir de corpos hídricos distintos separados por grandes distâncias, podendo ser bastante útil para grandes obras de engenharia como projetos de hidrelétricas e canais de irrigação. Também pode ser viável a integração entre redes altimétricas nacionais, como Brasil e Paraguai via superfície do lago da usina hidroelétrica de Itaipu por exemplo.

Para que o objetivo principal possa ser alcançado, algumas metas específicas são estabelecidas. Uma das metas é definir qual método de medida da superfície da água é mais adequado: radar ou lidar. Uma vez estabelecido o melhor método, é realizado o ajustamento dos dados (pontos das trilhas) e escolhido o melhor resultado de uma série de ajustamentos do mesmo modelo. São também estabelecidas quais abordagens são utilizadas para o cálculo dos desníveis sobre a superfície da água a

partir dos pontos do sensor orbital altímetro: dados instantâneos, médias espaciais e médias temporais. O uso dos métodos terrestres de nivelamento, como já abordado, permitem que todos os dados estejam sob o mesmo referencial altimétrico, sendo o nivelamento geométrico e trigonométrico já bem conhecidos. No entanto, como a calibração ou “determinação do zero da régua” em linímetros/linígrafos depende da medida de distância sobre a superfície da água com uma estação total, é necessário que se use um dispositivo flutuador sobre a superfície, que impeça a penetração do sinal na água e retorno de valores errôneos de distâncias e, conseqüentemente, de desníveis.

No nivelamento híbrido são realizados o nivelamento geométrico sobre a terra (conexão terra-terra), o nivelamento hidrográfico orbital sobre a superfície da água (conexão água-água) e o nivelamento trigonométrico para vincular os linímetros/linígrafos às referências verticais em terra (conexão terra-água ou água-terra). Foram realizados experimentos no Lago Guaíba, no estado do Rio Grande do Sul, entre quatro estações linimétricas denominadas de Cais Mauá C6 (SPH), Cristal, Ipanema e Terminal CatSul Guaíba (Guaíba). Estes experimentos foram realizados para avaliar a viabilidade do uso da altimetria orbital e nivelamento hidrográfico para integrar referenciais altimétricos a partir dos dados dos linímetros/linígrafos existentes, das referências de nível da RAAP no entorno do Lago Guaíba e das missões dos satélites altímetros. Para estes experimentos foram usadas as trilhas dos satélites altímetros que interceptam o Lago Guaíba em função das altitudes elipsoidais calculadas a partir dos parâmetros disponibilizados. Para a conversão das altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas foi utilizado o modelo geoidal MapGeo2015, desenvolvido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em parceria com a escola politécnica da universidade de São Paulo (EPUSP). Embora os Modelos Globais do Geopotencial (GGMs) sejam ideais para a aplicação global (MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020), quando estes modelos são somente satélites, não são adequados para a determinação da MDT costeira (HUANG, 2017), portanto, seriam inadequados para a aplicação em corpos hídricos continentais.

A avaliação dos resultados e aplicabilidade do método foi realizada a partir das discrepâncias e erro padrão entre o nivelamento geométrico terrestre e o nivelamento híbrido que conecta cada par de estações linimétricas/linigráficas. Na validação do método foram usadas as diferenças máximas aceitáveis presentes nas especificações

e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro (IBGE, 2017) e também na norma técnica brasileira NBR13.133 (ABNT, 1994, 2021), em função da distância percorrida pelo nivelamento geométrico (maior distância) e pela distância usada no nivelamento hidrográfico orbital (linha reta – menor distância).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Superfícies geodésicas

A principal tarefa científica da geodésia é a determinação das medidas e tipos de superfícies que representem a Terra em sua totalidade além de se ocupar do campo gravitacional externo terrestre (ZAKATOV, 1976) e da componente centrífuga gerada pela rotação em torno do seu eixo polar. Quatro superfícies são de especial importância para a geodésia, além da superfície topográfica: elipsoide, geoide, teluróide e quase-geoide.

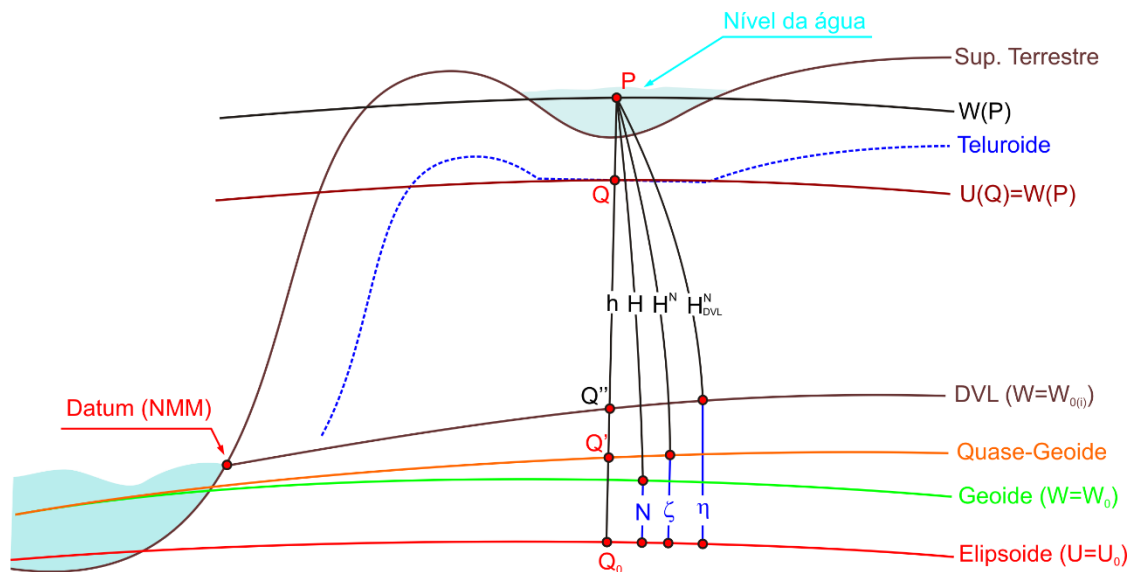
A superfície regular é representada por um elipsoide de revolução, achatado nos polos, que serve de superfície de referência e sobre a qual são efetuados os cálculos geodésicos (ZAKATOV, 1976). O elipsoide de revolução (biaxial) é a forma geométrica gerada pela rotação de uma semi-elipse em torno do seu eixo menor (TORGE; MÜLLER, 2012). O elipsoide representa a Terra normal, ou seja, um corpo sólido, homogêneo, com a mesma massa da Terra real e velocidade de rotação uniforme e cujo potencial de gravidade é denominado esferopotencial ( $U$ ) (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006).

Os geopes são superfícies equipotenciais do campo de gravidade da Terra real, cujo potencial de gravidade é denominado geopotencial ( $W$ ). Como não há homogeneidade da distribuição das massas no interior da crosta terrestre, as superfícies são irregulares (HOFMANN-WELLENHOF; MORITZ, 2006). O geoide é considerado o geope fundamental ( $W_0$ ) e é definido como a superfície equipotencial do campo de gravidade que mais se aproxima do nível médio não perturbado dos mares (TORGE; MÜLLER, 2012), podendo variar de -2 m até +1 m (WOODWORTH et al., 2015).

O teluróide é a superfície que possui o esferopotencial igual ao geopotencial do ponto sobre a superfície topográfica, seguindo aproximadamente a forma do relevo terrestre, tendo os valores de anomalia de altura ( $\zeta$ ) os separando (VANÍČEK et al., 2003). Aplicando os valores de anomalia de altura ao elipsoide, encontra-se a superfície do quase-geoide (FEATHERSTONE et al., 2018) que é próximo ao geoide e se afasta a medida em que o relevo vai se tornando mais montanhoso.

Outra superfície que pode eventualmente ser aplicada em uma região é o geope passante pelo referencial vertical local ( $W_{0(i)}$ ) caracterizado pelo nível médio do mar (NMM) observado por um determinado período de tempo, materializando o *datum* vertical local (DVL), ilustrado pela figura 01 junto com as outras principais superfícies geodésicas.

Figura 01 – Principais superfícies de interesse da geodésia e suas relações.



Fonte: Elaboração própria.

As relações entre as superfícies e o elipsoide de referência são mostradas na sequência pelas equações 01, 02 e 03.

$$H^N \cong h - \zeta \quad (01)$$

$$H^{NL} \cong h - \eta \quad (02)$$

$$H \cong h - N \quad (03)$$

Onde:  $H^N$  = Altitude normal referenciada ao quase-geóide;

$H^{NL}$  = Altitude normal referenciada ao *datum* vertical local;

$H$  = Altitude ortométrica;

$h$  = altitude elipsoidal (geométrica);

$\zeta$  = Anomalia de altura (separação quase-geóide - elipsoide);

$\eta$  = Fator de conversão (separação DVL - elipsoide);

$N$  = Altura geoidal (separação geoide - elipsoide).

## 2.2 Referenciais geodésicos

Os sistemas geodésicos de referência são definidos por constantes, convenções, modelos e parâmetros que servem como base matemática necessária para a representação de quantidades geométricas e físicas terrestres (DREWES, 2009). As redes geodésicas constituem a estrutura de referência (*reference frame*), que é a materialização física dos sistemas geodésicos de referência por meio da determinação dos parâmetros (coordenadas) sobre os marcos geodésicos (DREWES, 2009).

Uma rede de referência geodésica serve de apoio aos levantamentos topográficos e, em geral, é materializada por um conjunto de pontos cujas coordenadas são conhecidas com rigor (CASACA; DE MATOS; DIAS, 2000). A rede geodésica de referência é formada por um conjunto de pontos materializados na superfície física da Terra, associados a um conjunto de coordenadas geodésicas (SEGANTINE; SILVA, 2015).

O *Datum* geodésico fixa inequivocamente a relação entre a rede de referência e o sistema geodésico de referência por meio do estabelecimento dos parâmetros como as coordenadas de origem do sistema ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), ( $H_0$ ) e atualmente ( $W_0$ ), as direções dos eixos de coordenadas ( $X, Y, Z$ ), altitude ( $H$ ), potencial ( $W$ ) e a escala, ou seja, os sistemas geodésicos de referência estão associados aos *data* horizontal e vertical (DREWES, 2009).

A antiga definição de *datum* (topocêntrico) diz que é uma referência a partir da qual são determinadas as posições de elementos geográficos na superfície terrestre, possuindo assim origem e orientação do sistema de coordenadas estabelecido. O *datum* horizontal é usado como referência para a determinação das coordenadas horizontais, definidas pelas coordenadas geodésicas (latitude e longitude), por uma direção e por parâmetros definidores de um elipsoide de referência (SEGANTINE; SILVA, 2015).

O conceito antigo de *datum* vertical diz que o mesmo é usado como referência para a determinação das altitudes ortométricas dos pontos, sendo a distância de um

ponto sobre a superfície terrestre e um ponto que tem, por convenção, altitude zero, sendo este ponto, no caso do Brasil, o geope passante pelo nível 0 do marégrafo de Imbituba (GEMAEL, 1988). Também pode ser definido como a superfície de altitude zero de um sistema nacional de altitudes, normalmente o nível médio dos mares observado por um certo período de tempo, sendo essa uma conceituação já ultrapassada e que já sofreu alteração (TORGE; MÜLLER, 2012).

As definições acima tratam dos sistemas geodésicos clássicos (locais), que atendem às necessidades apenas da própria região ou país em que estão inseridos. O conceito moderno de sistemas de referências geodésicos são os sistemas globais, que são sistemas quadridimensionais, pois envolvem também a variável tempo (TORGE; MÜLLER, 2012). O sistema de referência global é materializado pelo ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), que são realizações do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), à cargo do IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) (MONICO, 2000). O ITRF é a base para o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). A materialização do SIRGAS faz parte do ITRF.

O SIRGAS2000 está referenciado ao elipsoide GRS80 e deriva do ITRF2000 (época 2000,4) (IBGE, 2017). As coordenadas determinadas a partir do GPS estão referenciadas ao *World Geodetic System* de 1984 (WGS84) (MONICO, 2000). WGS84 e ITRF são refinados constantemente, sendo que a última realização do WGS84 é denominada WGS84(G2139) implementada em 03/01/2021 e que usa por base as próprias estações ITRF (KELLY; DENNIS, 2022). A última realização do ITRF é o ITRF2020 (época de referência 2015,0) (ITRF, 2022). Não há parâmetros de transformação entre o WGS84 e o ITRF, então considera-se que as últimas realizações do WGS84 (G1674, G1762 e G2139) e do ITRF (2008, 2014 e 2020) concordam ao nível do centímetro (NGA, 2022). Quanto às outras constelações constituintes do GNSS, o GLONASS está referenciado ao PZ90 (*Parametry Zimli* 1990), o Galileo ao GTRF (*Galileo Terrestrial Reference Frame*) e o Beidou ao BDCS (*Beidou Coordinate System*) (WEI; WU; LIU, 2019).

Caso haja a necessidade de atualização das coordenadas, pode ser realizada uma transformação entre a realização WGS84 e ITRF na época da coleta de dados dos satélites altímetros para a época de referência do SIRGAS2000 utilizando os



parâmetros de transformações disponibilizados (ITRF, 2022b). A transformação das coordenadas é efetuada a partir da equação dos sete parâmetros (equação 04).

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + D \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -RZ & RY \\ RZ & 0 & -RX \\ -RY & RX & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (04)$$

Onde:  $X', Y', Z'$  = Coordenadas cartesianas geocêntricas transformadas;

$X, Y, Z$  = Coordenadas cartesianas geocêntricas originais;

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  = Parâmetros de translação;

$RX, RY, RZ$  = Parâmetros de rotação;

$D$  = *Parâmetro de escala*.

Quando não há deformação de escala e as rotações forem nulas ou desprezíveis (valores baixos), a equação é simplificada para os três parâmetros de translação conforme mostra a equação 05.

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (05)$$

A aplicação clássica do sistema de referência vertical (sistema local) consiste no estabelecimento de uma referência de nível a partir da observação do nível do mar em um marégrafo por um determinado período de tempo e materialização da rede por meio do nivelamento geométrico (DREWES et al., 2002), podendo utilizar informações gravimétricas para a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais e irregularidades. O conceito moderno de sistema de referência vertical inclui uma referência única global, com altitude estabelecidas a partir de métodos terrestres (como o nivelamento geométrico por exemplo), medidas da gravidade e obtenção do número geopotencial (diferença de potencial) entre uma referência global e os pontos da rede. Assim está sendo implementado o IHRS (*International Height Reference System*) e a sua realização denominada IHRF (*International Height Reference Frame*), com geopotencial  $W_0 = 62.636.853,4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$  (SÁNCHEZ, 2019) e vinculado ao SIRGAS (SÁNCHEZ; DE FREITAS, 2016). Para a unificação dos referenciais verticais, é recomendado o uso de números geopotenciais ou altitudes normais para minimizar as discrepâncias causadas pelo uso de diferentes hipóteses quanto à distribuição de massas para o cálculo das altitudes ortométricas (IHDE et al., 2017; SÁNCHEZ et al., 2021). A unificação dos referenciais verticais também é necessária devido a

heterogeneidade entre as redes altimétricas locais, principalmente quanto ao tipo de altitude usada. Muitas vezes, a conexão de redes altimétricas de países contíguos se torna inviável devido a este fato. Um bom exemplo disto, são os tipos de altitude usadas pelo mundo. Enquanto os países da América do Norte (Canadá, Estados Unidos e México) adotam a altitude ortométrica (CARRERA-HERNÁNDEZ, 2020; SMITH et al., 2013; VÉRONNEAU; HUANG, 2016), os países europeus se dividem entre as altitudes normais (a maioria), normais-ortométricas (Grã Bretanha, Áustria, Eslovênia, Croácia, Bósnia-Herzegovina, Sérvia, Albânia, Montenegro, Kosovo e Macedônia do Norte) e ortométricas (Portugal, Espanha, Itália, Dinamarca, Irlanda, Grécia, Turquia e Luxemburgo), além de países onde não há reduções gravimétricas nas redes altimétricas como os Países Baixos, a Bélgica e a Suíça (BKG, 2022; RÜLKE et al., 2012).

Na América do Sul também é encontrada esta heterogeneidade, como por exemplo, a Argentina que adota a altitude ortométrica, o Brasil que adota uma altitude normal referenciada a uma superfície representativa do seu próprio *datum* vertical e a Colômbia, cuja rede não possui reduções gravimétricas e tem caráter puramente geométrico (IBGE, 2019; IGAC, 2022; IGN, 2022). A recomendação oficial do SIRGAS é de que a altitude física adotada seja a altitude normal, porém, como alguns países adotam a altitude ortométrica, foi decidido definir um referencial vertical em termos de geopotencial, sendo  $W_0$  a referência de nível e o número geopotencial a coordenada primária, assim cada país pode reduzir à altitude física que quiser de acordo com a superfície escolhida: geóide (gravidade real), ou quase-geóide (gravidade teórica ou normal) (DE FREITAS, 2015).

### 2.3 Outros níveis de referência

As altitudes de marés e profundidades provenientes de sondagens batimétricas são reduzidas a um nível de referência vertical oceânico denominado *Chart Datum* (SANTANA; DALAZOANA, 2020). Visando a segurança da navegação, a Organização Hidrográfica Internacional (OHI) recomenda, para regiões oceânicas influenciadas pela maré, a adoção da menor maré astronômica (*Lowest Astronomical Tide* - LAT) ou de outro nível equivalente próximo como *Chart Datum* ou *Datum* da Carta Náutica (DCN) (MARINHA DO BRASIL, 2023; SANTANA et al., 2020). No LAT é usado o nível da maré mais baixa que pode ocorrer em condições meteorológicas médias e em

quaisquer condições astronômicas (SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014; ZAPATA et al., 2019), devendo ser referenciada ao elipsoide de referência. Nas cartas náuticas brasileiras, o DCN é conhecido como nível de redução e corresponde aproximadamente ao plano de referência dado pela Média das Baixas Marés de Sizígia (MLWS - *Mean Low Water Springs*) (SANTANA; DALAZOANA, 2020), de caráter puramente local. Além de referência para cartas náuticas e outras atividades oceânicas, para aplicações hidrométricas o *Chart Datum* é mais aplicável para validar dados e modelos de diferentes fontes do que dados de marégrafos referenciados ao geoide, podendo identificar algum viés entre fontes, erros sistemáticos e aleatórios (JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021).

## 2.4 O sistema geodésico brasileiro (SGB)

O sistema geodésico brasileiro é materializado por um conjunto de pontos implantados na superfície terrestre dentro do território brasileiro, que são determinados por procedimentos operacionais e coordenadas calculadas. O SGB é dividido em redes altimétrica, planimétrica e gravimétrica (IBGE, 2019). Segundo o documento R.PR 1/2005 de 25/02/2005, o SGB é caracterizado por:

- Sistema Geodésico de referência: *International Terrestrial Reference System* (ITRS);
- Figura geométrica para a Terra: Elipsoide do *Geodetic Reference System* 1980 – GRS80;
- *Datum* vertical: Imbituba e Santana (IBGE, 2019);
- Origem do sistema: Centro de massa da Terra;
- Orientação: Polos e meridianos de referência consistentes em  $\pm 0,005''$  com as direções definidas pelo *Bureau International de l'Heure* em 1984,0;
- Época de referência das coordenadas: 2000,4;
- Materialização: Por meio de todas as estações componentes da rede geodésica brasileira, implantada a partir das estações de referência que compõem o sistema SIRGAS2000.

### 2.4.1 Rede planimétrica

A rede planimétrica é constituída por um conjunto de estações geodésicas que materializam as componentes planimétricas horizontais (latitude e longitude) e

planialtimétricas (coordenadas horizontais e verticais) do IBGE, sendo classificadas e denominadas como estações SAT GNSS (determinadas a partir do sistema de posicionamento baseada em satélites artificiais GNSS), estações SAT DOPPLER (determinadas a partir do sistema de posicionamento baseada em satélites artificiais NNSS-TRANSIT), estações de poligonação e de triangulação (determinadas por meio de métodos clássicos de levantamento terrestre) (IBGE, 2017). Os primeiros levantamentos foram realizados em 1939 para a determinação das coordenadas de cidades e vilas a partir de observações astronômicas. A partir de 1944, deu-se início ao estabelecimento de estações planimétricas por triangulação densificada por poligonação. Na década de 1970, foram efetuados os primeiros levantamentos utilizando satélites artificiais a partir do sistema *Navy Navigation Satellite System* (NNSS-TRANSIT) a partir do efeito doppler. A partir de 1991 começaram a ser estabelecidas as redes estaduais de estações passivas a partir do NAVSTAR/GPS e em 1996 começou a ser estabelecida a rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS (RBMC) por meio de uma rede de estações ativas.

#### 2.4.2 Rede altimétrica

A rede altimétrica de alta precisão (RAAP) é composta por estações geodésicas denominadas referência de nível que materializam a componente vertical (altitudes) do SGB, determinadas por meio do nivelamento geométrico geodésico de alta precisão (IBGE, 2017). As campanhas de nivelamento começaram em meados da década de 1940. A medida que novas linhas são agregadas à RAAP e novas técnicas são desenvolvidas, a rede é recalculada e reajustada por meio do método dos mínimos quadrados (IBGE, 2019).

A fim de se obter altitudes com significado físico rigoroso, foi aprimorada a cobertura gravimétrica no território brasileiro, o que permitiu a conversão dos desníveis observados a partir do nivelamento geométrico geodésico ótico em diferenças de geopotencial para o reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais a partir do ano de 2015 (IBGE, 2019). Atualmente o aprimoramento da cobertura gravimétrica também é uma recomendação da *International Association of Geodesy* (IAG) inerente aos *International Height Reference System/International Height Reference Frame* (IHRM/IHRF). Como resultado, em termos absolutos, 87,5%

dos números geopotenciais ajustados tiveram desvios padrão entre 6 cm e 10 cm e em termos relativos, 92,7% sofreram correções na faixa de  $\pm 1\text{mm}\cdot\sqrt{k}$  (IBGE, 2019).

A fim de servirem de referência para a avaliação dos resultados do desenvolvimento do modelo geoidal MapGeo2015 (BLITZKOW et al., 2016), algumas referências de nível foram rastreadas com receptores GNSS a fim de obter as coordenadas horizontais precisas e altitude elipsoidal, uma vez que a partir do nivelamento geométrico as referências de nível já dispunham de altitude normal-ortométrica (denominadas coloquialmente na época como ortométricas), contando apenas com a correção do não paralelismo das superfícies equipotenciais. Com as coordenadas horizontais (latitude e longitude) precisas é possível extrair a altura geoidal do MapGeo2015 ( $N_{\text{MAP}}$ ), assim como partir da diferença entre a altitude elipsoidal e a altitude ortométrica a altura geoidal também pode ser calculada ( $N \cong h - H$ ). As discrepâncias entre o  $N_{\text{MAP}}$  e o  $N$  foram usadas para avaliar o modelo MapGeo2015.

A principal diferença entre as altitudes ortométricas rigorosamente determinadas e as altitudes normais-ortométricas é o tipo de gravidade usada para os cálculos das diferenças de geopotencial na superfície física e na conversão do número geopotencial em altitude (valor médio da gravidade ao longo da direção do fio de prumo) (IBGE, 2019). Para a altitude ortométrica rigorosa utiliza-se a gravidade real nas duas etapas, porém, este tipo de gravidade não pode ser medida no interior da Terra, então uma hipótese sobre a distribuição de massas deve ser elaborada (YILMAZ, 2008), sendo que hipóteses diferentes podem levar a resultados diferentes. Já a altitude normal-ortométrica utiliza a gravidade teórica (normal) nas duas etapas. Em um experimento realizado no estado de São Paulo por Albarici et al.(2019), as diferenças entre a altitude normal-ortométrica e a altitude ortométrica rigorosamente determinada ficaram entre 0,47 m e -0,72 m, as diferenças entre a altitude ortométrica rigorosa e a altitude normal ficaram entre 0,37 m e -0,05 m e as diferenças entre a altitude normal-ortométrica e a altitude normal ficaram entre 1,24 m e -0,49 m.

#### *2.4.3 Rede gravimétrica*

A rede gravimétrica é constituída por estações geodésicas que contêm informações de aceleração da gravidade e suas características (IBGE, 2019). Os primeiros levantamentos gravimétricos foram executados em 1956 para o

estabelecimento do *datum* horizontal brasileiro, porém, o levantamento sistemático só começou a ser realizado em 1990 (IBGE, 2019). A rede gravimétrica é importante para o estabelecimento do mapa geoidal brasileiro e determinação dos fatores de conversão de altitudes elipsoidais em altitudes normais representados pelo *hgeoHNOR2020*. A partir de 2006 foram iniciados os levantamentos gravimétricos sobre as principais linhas de nivelamento da rede altimétrica de alta precisão para a determinação das altitudes científicas (IBGE, 2019).

## 2.5 Superfície do nível da água

A superfície do mar ou oceano é definida como o seu limite superior fluído, entre a atmosfera e a superfície da terra sólida, caracterizada pelo fundo do mar (GREGORY et al., 2019). A média temporal desta superfície caracteriza o nível médio do mar, cujo tempo de observação deve ser o suficiente para eliminar os efeitos das ondas e outras flutuações induzidas por fenômenos meteorológicos, além das marés (GREGORY et al., 2019).

Na determinação do nível dos mares/oceanos, do ponto de vista geodésico, pelo menos quatro parâmetros devem ser observados. Dois destes parâmetros se apresentam em termos de superfícies de referência, sendo a altitude elipsoidal e a altitude ortométrica. Os outros dois se apresentam em termos de temporalidade, podendo se caracterizar por valores instantâneos ou médios. Desta forma, cinco variáveis são usadas para caracterizar o nível do mar: a superfície instantânea em relação ao elipsoide, a superfície instantânea em relação ao geoide, a superfície média em relação ao elipsoide, a superfície média em relação ao geoide e a separação entre a superfície instantânea e a superfície média.

A altura da superfície da água (mar e outros corpos hídricos) em relação ao elipsoide, em função da sua posição e instante no tempo, é denominada de *Sea Surface Height* (SSH) (GREGORY et al., 2019; IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2017; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020). É amplamente usada na literatura e parece não deixar dúvidas quanto ao seu significado (JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021). A dúvida, se houver, pode estar relacionada com a altitude ortométrica, que também pode ser considerado uma SSH, porém referenciada a uma superfície dinâmica (GREGORY et al., 2019). Para deixar clara a diferença, o termo “dinâmico” é inserido na terminologia.

A altura da superfície média da água em relação ao elipsoide, em função da posição, parece não encontrar um consenso entre diversos pesquisadores. Em grande parte da literatura, costuma-se utilizar o termo *Mean Sea Surface* (MSS) (ANDERSEN et al., 2018; JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021; KARIMI; ANDERSEN; DENG, 2021; WOODWORTH et al., 2015) ou *Mean Sea Level* (MSL) (GREGORY et al., 2019; HUANG, 2017; SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014). Alguns trabalhos usam as duas terminologias, porém o MSS é usado para os satélites altímetros e o MSL para os marégrafos (FILMER et al., 2018; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020). Para não ficar atrelado somente aos mares e oceanos, há também um termo geral *Mean Water Level* (MWL) (AFRASTEH et al., 2021; SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014). Talvez fosse interessante o uso do termo MSL pois MSS não deixa claro a distinção quanto ao SSH, podendo haver confusão entre o valor médio do nível da água em função da posição com o valor médio dos pontos distribuídos sobre a superfície (GREGORY et al., 2019), mesmo assim, o termo MSS parece ser mais comum na bibliografia. O MSS por sua vez é obtido a partir da observação do SSH por um determinado período de tempo. O ideal é que modelos do MSL deveriam contar com, pelo menos, dez anos de observação do nível do mar e, marégrafos sujeitos aos efeitos baroclínicos (descarga de rios por exemplo), podem ser excluídos (AFRASTEH et al., 2021; SLOBBE et al., 2018).

Das diferenças entre o SSH e o MSS em um determinado tempo  $t$  ( $\delta h_t$ ) é determinada a anomalia de altitude da superfície da água em função da posição e do tempo, denominada de *Sea Level Anomaly* (SLA) (DINARDO, 2020), também identificada como *Sea Surface Height Anomaly* (SSHA) (STAMMER; CAZENAVE, 2017) e apresentada na equação 06. A altura do nível da água em relação ao elipsoide ( $h_t^{\text{SSH}}$ ) em cada ponto é dada pela relação entre o MSS e o SLA conforme mostra a equação 07.

$$\delta H_t = \delta H_t^{\text{SLA}} = H_t^{\text{ADT}} - H_t^{\text{MDT}} \quad (06)$$

$$h_t^{\text{SSH}} = \delta h_t + h_t^{\text{MSS}} \quad (07)$$

Como o SSH e o MSS estão referenciados ao elipsoide, há a necessidade da transformação em altitudes vinculadas ao campo de gravidade e que representem adequadamente o escoamento de massas, como o fluxo da água por exemplo. Por

isso é necessária a determinação das altitudes referenciadas a uma superfície equipotencial do campo de gravidade terrestre.

Para o nível da água em relação ao geóide, em função da posição e do tempo, são encontradas terminologias como *Ocean Dynamic Topography* (ODT) (GREGORY et al., 2019; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020), *Absolute Dynamic Topography* (ADT) (COPERNICUS; EUMETSAT, 2017; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020) e *Dynamical Ocean Topography* (DOT) (IDŽANOVIĆ; OPHAUG; ANDERSEN, 2017; MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020), *Sea Surface Topography* (SST) e *Mean Dynamic Ocean Topography* (MDOT) (MILLS; DODD, 2014) portanto, parece não haver consenso para identificar a variável. Outras terminologias, como por exemplo, *Sea Dynamic Topography* (SDT), poderiam ser mais adequadas e identificar de forma mais clara a variável. Desta forma optou-se por utilizar o termo ADT, presente nos manuais dos satélites altímetros.

A altura da superfície média do nível da água em relação ao geóide, em função da posição, formada pelos valores médios do ADT é denominada de *Mean Dynamic Topography* (MDT) (AFRASTEH et al., 2021; FILMER et al., 2018; HUANG, 2017; SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014) e *Dynamic Topography* (DT) (JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021). O termo DT não é recomendado por ser generalizado, podendo ser confundido com outros conceitos e substituído por *Ocean Dynamic Sea Level* (ODSL) (GREGORY et al., 2019). Porém, até o momento, o ODSL não é de uso generalizado e levanta algumas dúvidas pois não traz a ideia de valor temporal médio, mais adequado ao termo MDT, além de parecer redundante o uso simultâneo dos termos “ocean” e “sea”. Talvez o termo *Sea Mean Dynamic Topography* (SMDT) pudesse ser ao mesmo tempo claro e unívoco. O MDT figura como a representação da circulação oceânica (ANDERSEN et al., 2018), podendo ser derivado do MSL a partir de um modelo geoidal (FILMER et al., 2018). Sendo assim, a forma da superfície do mar sem a presença de forças perturbadoras como as marés, ventos e correntes caracteriza o geóide marinho, com a topografia dinâmica sendo impulsionada por processos termodinâmicos no oceano (STAMMER; CAZENAVE, 2017).

O quadro 01 mostra as siglas propostas por Gregory et al.(2019) e as siglas usadas em função da superfície de referência e temporalidade.



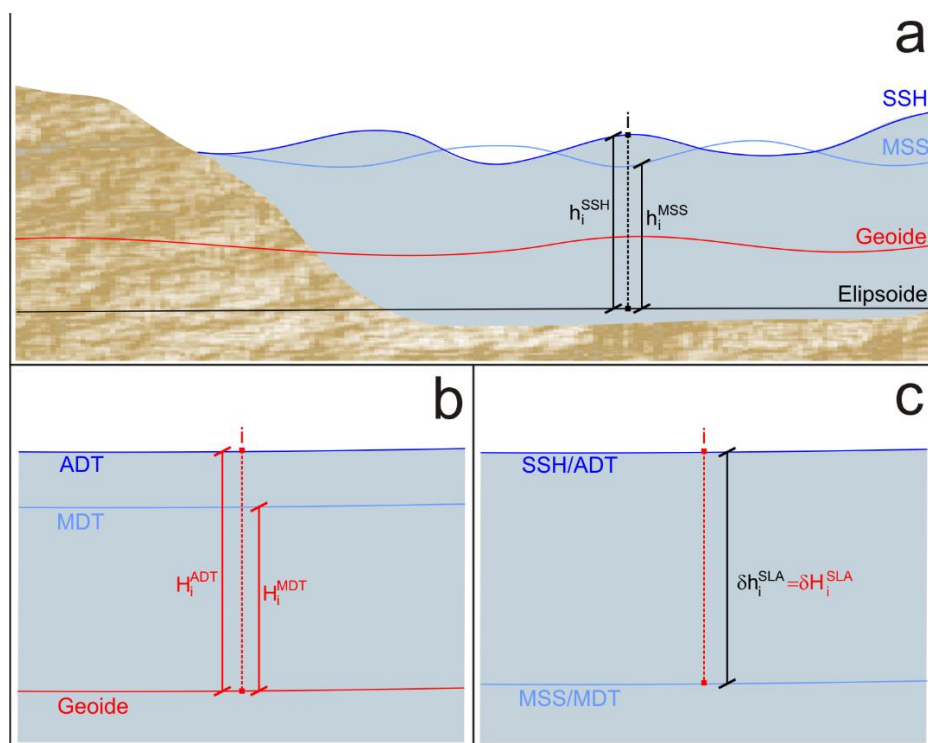
Quadro 01 – Siglas aplicadas às variáveis referentes à superfície da água média, instantânea e diferença entre as duas, proposta por Gregory et al. (2019) e adotada na pesquisa.

Superfície de referência	Temporalidade					
	Proposto por Gregory et al. (2019)			Adotado		
	Instantâneo	Médio	Anômalo	Instantâneo	Médio	Anômalo
Elipsoide	SSH	MSL	-	SSH	MSS	SLA
Geoide	ODT	ODSL	-	ADT	MDT	SLA

Fonte: Elaboração própria.

A figura 02 mostra as relações entre as superfícies média e instantânea com o elipsoide (02a), com o geoide (02b), a relação entre as superfícies média e instantânea (02c) e as variáveis envolvidas, sendo que o MDT também é conhecido com topografia do nível médio do mar (TNMM).

Figura 02 – Superfícies média (MSS/MDT), instantânea (SSH/ADT) e a relação entre as duas (SLA) referenciadas, respectivamente, ao elipsoide e ao geoide.



Fonte: Elaboração própria.

Além das siglas também são aplicados os símbolos matemáticos que identificam verticalmente um determinado ponto na superfície da água em relação às superfícies de referência (geoide e elipsoide) e que são apresentados no quadro 02. Neste caso há a preferência por unir a simbologia matemática já consagrada na literatura inerente à geodésia e sigla para tornar mais claro a que grandeza pertence determinado símbolo, ao invés de utilizar uma simbologia exclusiva. Gregory et al. (2019) parece ter uma “visão oceanográfica” destas grandezas e propõe símbolos diferentes. Estes símbolos poderiam gerar dúvidas quanto ao seu significado, como por exemplo  $\zeta$ , que na literatura geodésica simboliza a separação entre o elipsóide e o quase-geoide (anomalia de altura) enquanto para Gregory et al. (2019) simboliza a altitude média da superfície do mar em relação ao geoide.

Quadro 02 – Símbolos aplicados às variáveis referentes à superfície da água proposto por Gregory et al. (2019) e adotado na pesquisa.

Símbolo	Proposto por (GREGORY et al., 2019)	Adotado
Altura em relação ao geoide	$z$	$H$
Altura em relação ao elipsoide	$z'$	$h$
Altura geoidal	$G$	$N$
SSH	$\tilde{\eta}$	$h^{\text{SSH}}$
ADT	$\tilde{\zeta}$	$H^{\text{ADT}}$
MSS	$\eta$	$h^{\text{MSS}}$
MDT	$\zeta$	$H^{\text{MDT}}$
SLA	-	$\delta h^{\text{SLA}} = \delta H^{\text{SLA}}$

Fonte: Elaboração própria.

Com as constantes melhorias da qualidade na aplicação da altimetria orbital em corpos de água continentais, talvez houvesse a possibilidade de denominações mais gerais para tais aplicações, já que sempre estão relacionados aos mares e oceanos. Por exemplo, enquanto MDT e ADT podem ser considerados abrangentes e representam bem qualquer superfície hídrica, podendo ser utilizados a qualquer corpo de água, propõem-se que o MSL, SSH e SLA poderiam ter o “Sea” alterado por

“Water” em aplicações não oceânicas, como MWS (*Mean Water Surface*), WSH (*Water Surface Height*) e WLA (*Water Level Anomaly*), principalmente quanto a possibilidade de se determinar a topografia dinâmica média exclusiva para corpos hídricos continentais a partir dos satélites radares altímetros.

O cálculo do ADT e do MDT é realizado subtraindo-se o SSH e o MSS da altura geoidal (N) extraída de modelos geoidais, que devem ser precisos o suficiente para retornar valores confiáveis. A conversão das altitudes é efetuada a partir das equações 08 e 09, para um determinado ponto  $i$ .

$$H_i^{\text{ADT}} = h_i^{\text{SSH}} - N_i \quad (08)$$

$$H_i^{\text{MDT}} = h_i^{\text{MSS}} - N_i \quad (09)$$

Na determinação da superfície da água, são utilizadas três abordagens: geodésica, oceanográfica e híbrida (geodésica e oceanográfica) (ANDERSEN et al., 2018; FILMER et al., 2018; KARIMI; ANDERSEN; DENG, 2021). Os métodos geodésicos tradicionalmente usam o nivelamento geométrico combinado com o posicionamento GNSS e modelo geoidal para a determinação do MDT na costa a partir dos marégrafos (HUANG, 2017).

Na abordagem oceanográfica o MDT é obtido a partir da integração entre temperatura, pressão e salinidade (AFRASTEH et al., 2021). Os métodos oceanográficos tem pobre cobertura de dados na costa devido a serem coletados para oceanos profundos (KARIMI; ANDERSEN; DENG, 2021), mas possuem uniformidade espacial (MINTOURAKIS; PANOU; PARADISSIS, 2020). O nível da água varia de acordo com a maré, ventos e efeitos baroclínicos como a variação da densidade da água (AFRASTEH et al., 2021), porém os componentes baroclínicos são normalmente ignorados (SLOBBE; KLEES; GUNTER, 2014). Dependendo do ponto de observação do nível da água isso pode ser preocupante já que pequenos erros na superfície de referência vertical podem induzir a grandes fluxos de água e gerar instabilidade no modelo (AFRASTEH et al., 2021). As medidas com marégrafos e modelos hidrodinâmicos frequentemente resultam em um viés que deve ser quantificado e corrigido para melhorar os resultados e determinar o MDT de forma mais acurada e realista (JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021).

O método combinado (ou híbrido) assume as abordagens geodésica e oceanográfica. Integra modelos de circulação oceânica, posicionamento GNSS,

GGMs, satélites altímetros e marégrafos, realizando a sinergia entre modelos hidrodinâmicos e os marégrafos (JAHANMARD; DELPECHE-ELLMANN; ELLMANN, 2021).

Modelos do MSS e do MDT globais também são produzidos por duas instituições designadas para mantê-los atualizados: O *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES) e o centro de pesquisas espaciais da *Danmarks Tekniske Universitet* (DTU), respectivamente os modelos CLS (*Collect, Localisation, Satellites*) e DTU (HAMDEN et al., 2021).

## **2.6 Métodos de observação do nível da água a partir de estações de superfície**

As medidas do nível d'água podem ser realizadas a partir de réguas linimétricas e maregráficas com registro manual das observações, linígrafos e marégrafos com registro automático analógico (do tipo boia e contrapeso) ou digital (do tipo pressão ou radar), radar de abertura sintética (SAR) embarcados em satélites altímetros (CIPOLLINI et al., 2017) e da refletometria a partir do sistema global de navegação por satélite (GNSS-R) a partir de sensores embarcados em plataformas orbitais, aerotransportados ou estações terrestres próximas à superfície da água (NIEVINSKI et al., 2020).

O marégrafo provê informações valiosas sobre as mudanças no nível do mar, com séries de observação desde alguns segundos até séculos (CIPOLLINI et al., 2017). Porém, o instrumento em si monitora a oscilação da superfície do mar de forma relativa à estrutura onde está instalado, necessitando de rastreios contínuos GNSS sobre a estação maregráfica para a avaliação dos movimentos verticais do sensor com origem não oceânica, visando ter o nível médio do mar absoluto (HANNAH, 2010), ou seja, a obtenção da diferença de altura instantânea entre o nível da superfície do mar e um ponto fixo no continente. O movimento vertical do solo é uma das principais dificuldades para a interpretação das medidas no marégrafo (WÖPPELMANN; MARCOS, 2016).

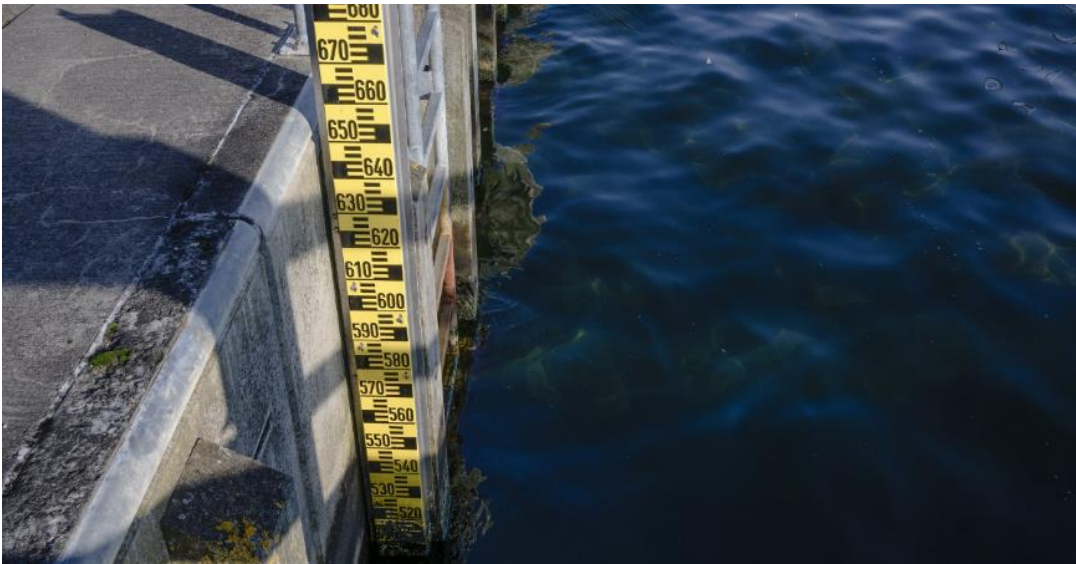
O marégrafo pode registrar, além das variações da maré, outras variáveis como a pressão atmosférica, densidade, correntes, e derretimento do gelo continental, além do movimento vertical dos continentes devido à mudanças tectônicas, ajustes isostáticos, vulcanismo, consolidação de sedimentos, subsidência do local onde se encontra o marégrafo dentre outros (WOPPELMANN; PIRAZZOLI, 2005), possuindo

também algumas limitações como o confinamento nas margens dos continentes e algumas ilhas oceânicas e com a maior parte localizada no hemisfério norte. Também não abrangem o mesmo período de observação (CIPOLLINI et al., 2017), provendo uma amostragem pobre acerca da superfície dos oceanos.

Os marégrafos/linígrafos podem ser do tipo puramente visual (réguas), flutuantes, acústicos, por pressão ou radar. Ainda podem ser analógicos, na qual o registro das observações é realizado de forma manual, ou digitais, cujos registros são realizados de forma automática.

As régua linimétrica ou mareométrica, quando aplicadas à mensuração do nível do mar, são os instrumentos mais antigos para a medida do nível da água (CIPOLLINI et al., 2017), com as leituras sendo efetuadas de forma visual, como mostra a figura 03, e os valores anotados em planilha para posterior divulgação. As régua mareométrica ou linimétrica têm a vantagem do baixo custo, porém são suscetíveis à instabilidade e erros (de anotação e de leitura devido as perturbações das ondas na régua).

Figura 03 – Régua mareométrica.

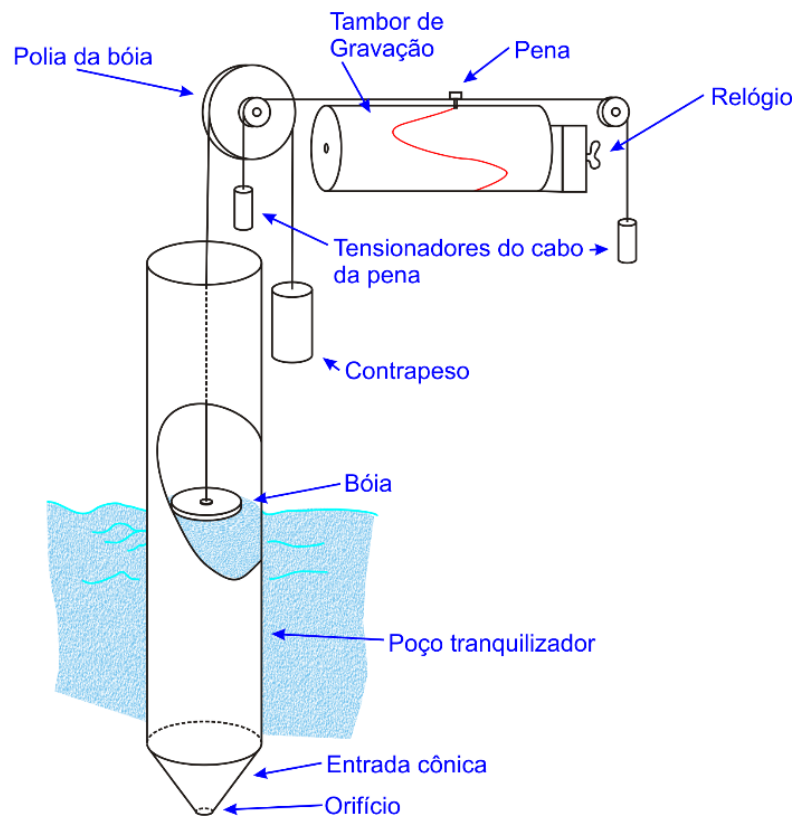


Fonte: HAIRE, 2021.

Os marégrafos/linígrafos flutuantes são constituídos por uma boia que, a partir de um cabo tensionado usando um contrapeso, transmite a variação do nível da água

para uma polia conectada a um conjunto de engrenagens que reduz e transmite os movimentos a um sistema de registro, constituído por uma pena e um maregrama cujo suporte é acionado por um relógio (IBGE, 2010). Também há sistemas de registro digitais que disponibilizam as leituras em tempo real. Normalmente, a boia (flutuador) está inserida em um tubo vertical, denominado poço tranquilizador, que evita impacto de objetos flutuantes, ondas e minimiza as variações bruscas do nível da água (IBGE, 2010). A figura 04 mostra o princípio de funcionamento do sistema.

Figura 04 – Marégrafo/Linígrafo flutuante tipo boia e contrapeso analógico.



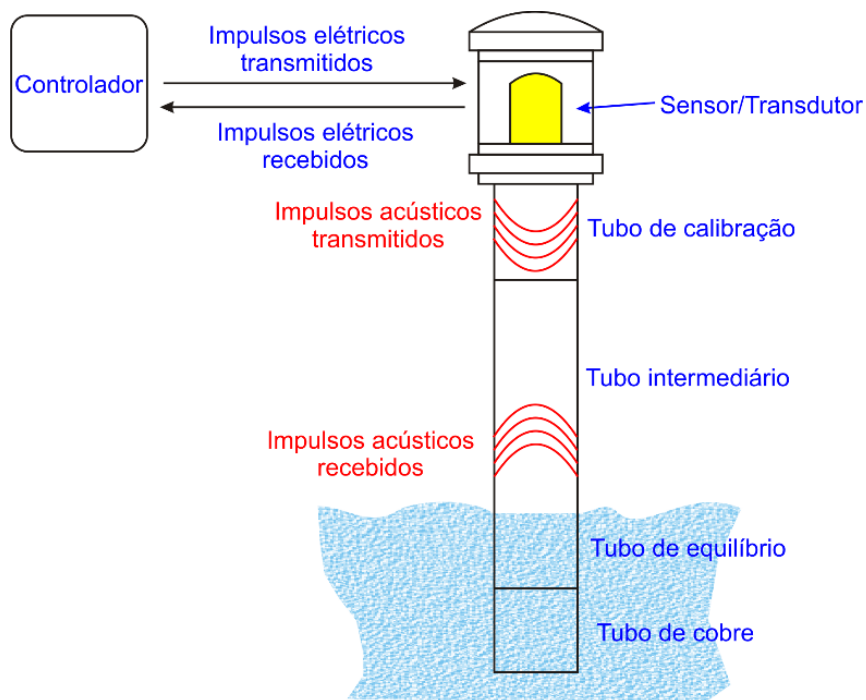
Fonte: INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, 1985.

Os marégrafos/linígrafos acústicos usam um microprocessador que controla a transmissão de uma série de impulsos elétricos pelo sensor até o transdutor, convertendo os impulsos elétricos em impulsos acústicos e enviando até a superfície da água por meio de um tubo, que protege os impulsos acústicos de fatores atmosféricos (RODRIGUES; CRISÓSTOMO, 2007). O tubo é dividido em seções denominadas tubo de calibração (assegura o retorno do eco a partir de uma distância

conhecida), tubo intermediário (canaliza os impulsos acústicos), tubo de equilíbrio (permite corrigir o comprimento total do conjunto de forma que sejam 20 cm menor que o poço de proteção) e um tubo de cobre (submerso, permite manter a extremidade do tubo livre de algas e animais marinhos) (RODRIGUES; CRISÓSTOMO, 2007).

Quando o sinal acústico passa pelo tubo de calibração, é produzido um eco que é enviado para o sensor. O mesmo impulso atinge a superfície da água e produz outro eco que também é enviado ao sensor. O sensor inicializa o transdutor, cronometra e registra o eco que percorre o tubo de calibração e o eco que é devolvido pelo impacto do impulso na superfície da água. Comparando o tempo que o impulso demora para percorrer uma distância conhecida (tubo de calibração) e a distância desconhecida até a superfície da água, é determinada esta distância desconhecida (RODRIGUES; CRISÓSTOMO, 2007). Os dados então são armazenados e disponibilizados. A figura 05 mostra o princípio básico de funcionamento de um marégrafo/linígrafo acústico.

Figura 05 – Marégrafo/Linígrafo acústico.



Fonte: Elaboração própria.

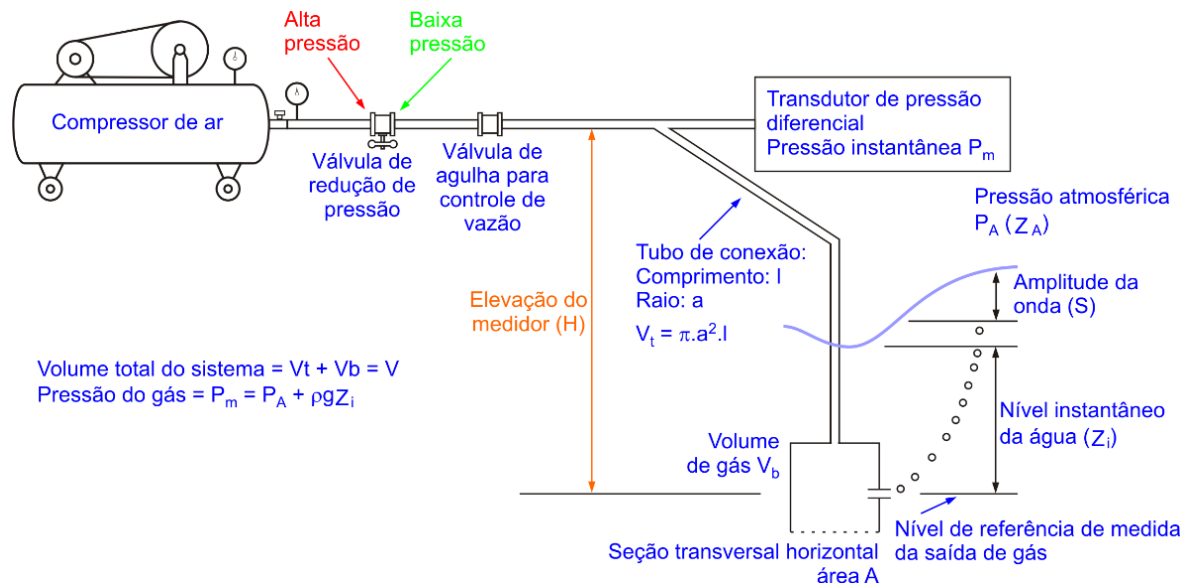
Há pelo menos dois modos de medir o nível da água por meio de sistemas de pressão: um sistema borbulhador e um sistema com transdutor de pressão.

Um sistema borbulhador usa ar comprimido para forçar o borbulhamento para fora de um recipiente. A pressão necessária para isso é a pressão hidrostática da coluna de água acima do recipiente e conduz a medida do nível da água (PUGH, 1972). O sistema consiste em um suprimento de gás comprimido, válvulas redutoras de pressão, um trecho de tubulação que conduz à um recipiente submerso e um manômetro para registrar a pressão necessária para forçar o gás para fora, sendo que a pressão é usada para calcular o nível da água (equação 10) (PUGH, 1972).

$$Z_i = \frac{(P_m - P_a)}{\rho \cdot g} \quad (10)$$

Onde  $Z_i$  é a altura do nível da água;  $P_m$  é a pressão medida no transdutor;  $P_a$  é a pressão atmosférica;  $\rho$  é a densidade da água; e  $g$  é a aceleração da gravidade. A figura 06 mostra o princípio de funcionamento de um sistema borbulhador.

Figura 06 – Princípio de funcionamento do sistema borbulhador.



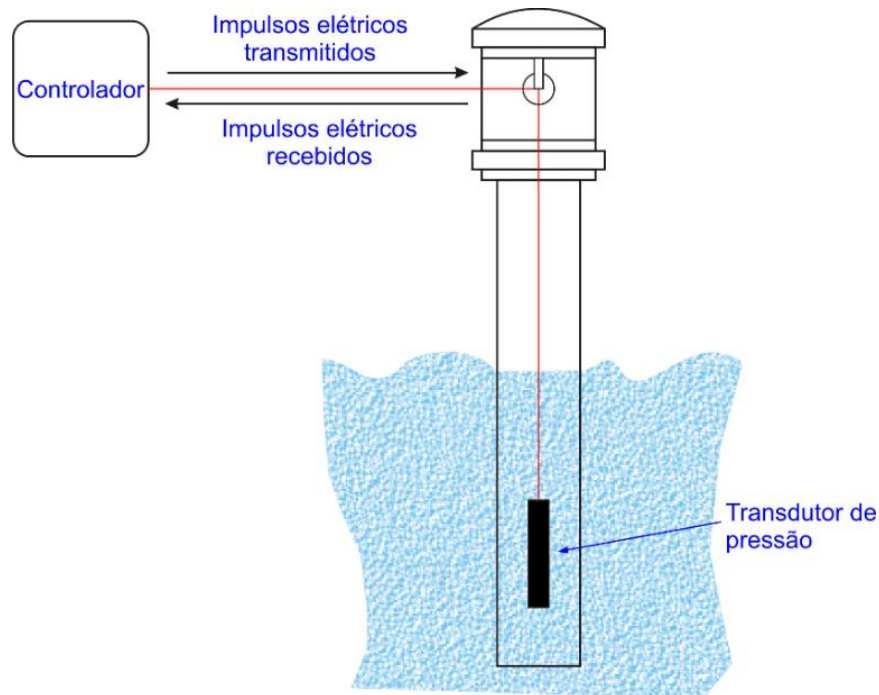
Fonte: PUGH, 1972

Nos sistemas baseados em sensores de pressão é utilizada a medida da pressão hidrostática da coluna da água acima de um transdutor submerso instalado dentro de um tubo (figura 07). São levadas em consideração a pressão exercida pela água no transdutor e a pressão atmosférica. As variações de pressão são transformadas em impulsos elétricos que são enviados ao controlador onde as informações são



interpretadas e convertidas em variações do nível da água (WOPPELMANN; PIRAZZOLI, 2005).

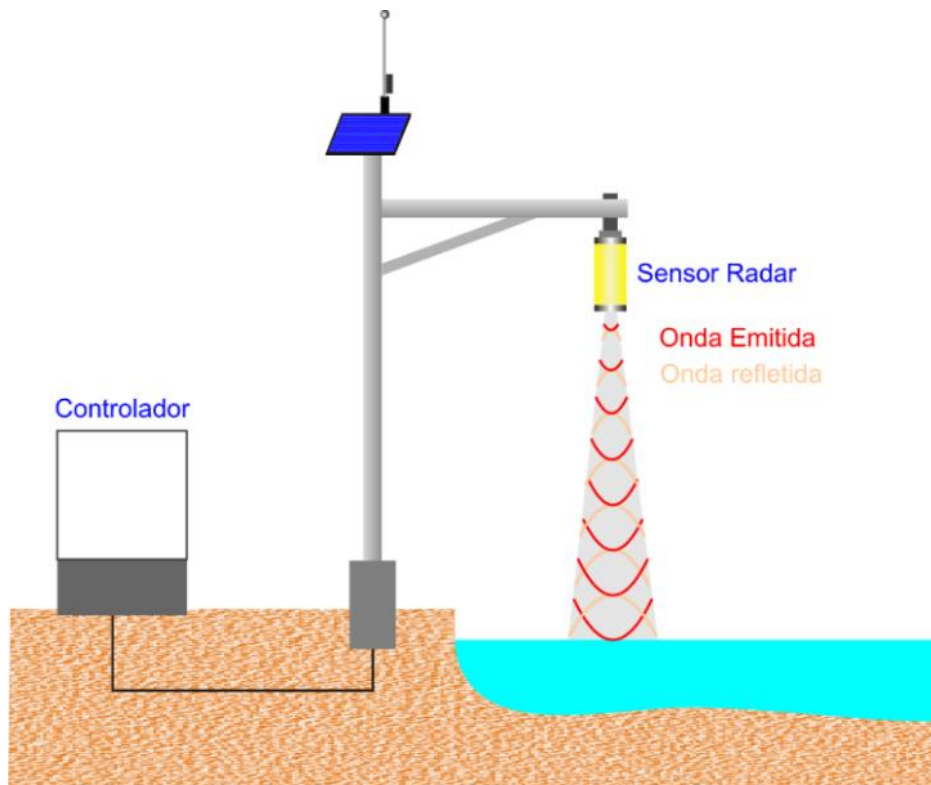
Figura 07 – Princípio de funcionamento do sistema com transdutor de pressão.



Fonte: Elaboração própria.

Nos marégrafos/linígrafos por radar, são utilizadas ondas de rádio ao invés de pulsos acústicos para a obtenção do nível da água. O sensor transmite pulsos curtos de radiação eletromagnética em direção à superfície da água e recebe a energia refletida/retroespalhada, em geral na faixa de frequência da banda K (entre 18 GHz e 27 GHz) (BATTOOL et al., 2020). As micro-ondas refletidas são analisadas quanto ao tempo de deslocamento de ida e volta dos pulsos para estimar a distância percorrida. A distância é determinada medindo a fase da onda de retorno desde que se conheça a frequência do sinal de micro-ondas que foi transmitido (PRABHUDESAI et al., 2010). A figura 08 mostra o desenho esquemático de um marégrafo/linígrafo radar.

Figura 08 – Esquema do marégrafo/linígrafo por radar.

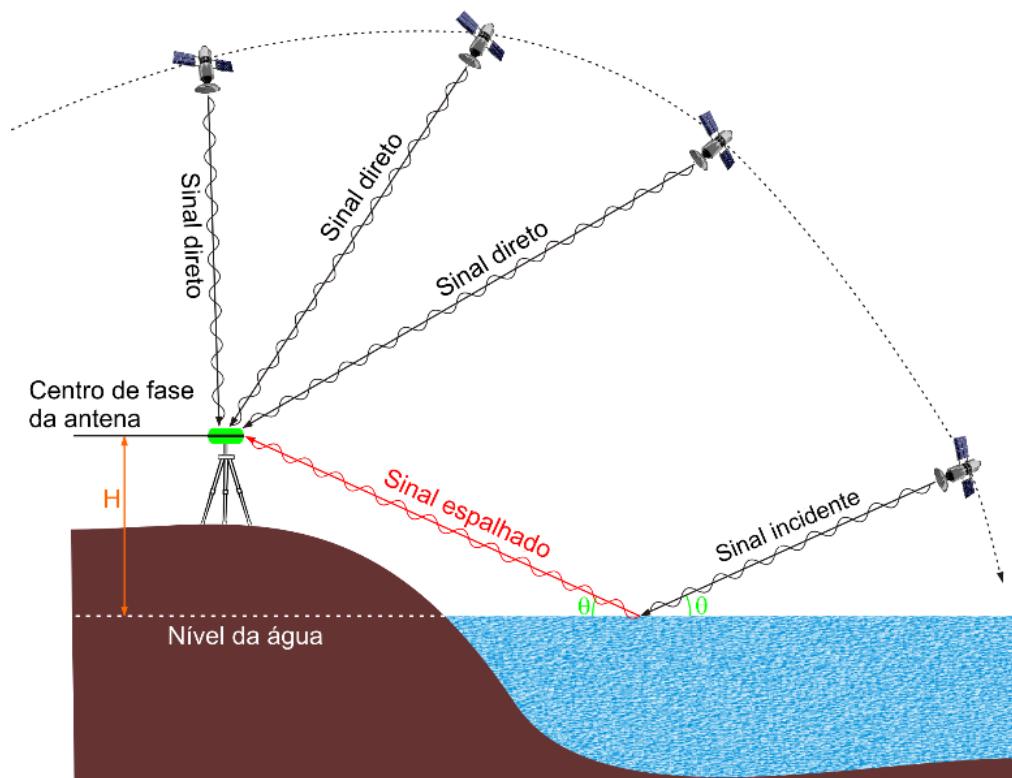


Fonte: Elaboração própria.

Ainda há outros sistemas e métodos de medida do nível da água menos utilizados, sejam pelo seu desempenho, custo ou especificidade. Um destes sistemas são as boias providas de receptores GNSS, com correção em tempo real (RTK) ou pós-processada que podem ser instaladas na costa, ancorada em alto mar (ou meio dos corpos de água) ou à deriva para coleta de informações do nível da água e dados de correntes, tendo a vantagem de já coletar a altitude elipsoidal com alta acurácia, porém, tem custo elevado e no Brasil, como em outros países, também fica sujeita a roubos e depredações (LIN et al., 2017). Um exemplo de aplicação viável de receptores GNSS flutuantes é descrito no trabalho de análise das variações das altitudes obtidas com RTK visando o monitoramento de massas de água por meio de plataformas Eulerianas, que são estruturas compostas por boias e aletas (EURIQUES; KRUEGER; VISKI, 2017). Há também os sistemas acústicos ao ar livre, sem tubos, porém de uso limitado pois sofre de reflexão secundária de diferentes superfícies de crista e vale de ondas, por isso, não apresenta bom desempenho para o monitoramento do nível do mar (INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, 1994).

Uma tecnologia atualmente em desenvolvimento é o GNSS *Interferometric Reflectometry* (GNSS-IR), também conhecido por GNSS *Multipath Reflectometry* (GNSS-MR) e GNSS *Interferometric Pattern Technique* (GNSS-IPT). É uma técnica aplicada ao GNSS-R baseada na recepção simultânea de sinais diretos e refletidos (FAGUNDES et al., 2021) com a vantagem em relação aos marégrafos de medir simultaneamente a posição tridimensional e o nível da superfície da água usando dados da fase da onda portadora (HOLDEN; LARSON, 2021) e observações da relação sinal-ruído (SNR) (FAGUNDES et al., 2021) respectivamente (figura 09).

Figura 09 – Princípio de funcionamento do GNSS-IR, a partir de radar inclinado (não nadiral).



Fonte: Elaboração própria.

As estações GNSS-IR são estabelecidas tradicionalmente nas margens dos lagos e zona costeira (CHEN; LIU; GUO, 2019) porém, Holden e Larson (2021) em seu trabalho no lago Taupō na Nova Zelândia, usaram a técnica no interior do lago e, embora este tipo de uso seja incomum, foi considerada vantajosa para testes do GNSS-IR. As estações terrestres podem ser estabelecidas com receptores GNSS

geodésicos que, além de terem um custo maior, podem ser um investimento de risco em áreas suscetíveis à danos aos equipamentos ou furto (FAGUNDES et al., 2021). Também há a alternativa de se construir um equipamento de baixo custo com materiais comuns disponíveis no mercado (BIAGI; GREC; NEGRETTI, 2016), permitindo o estabelecimento de um maior número de estações e melhor modelamento do fenômeno observado.

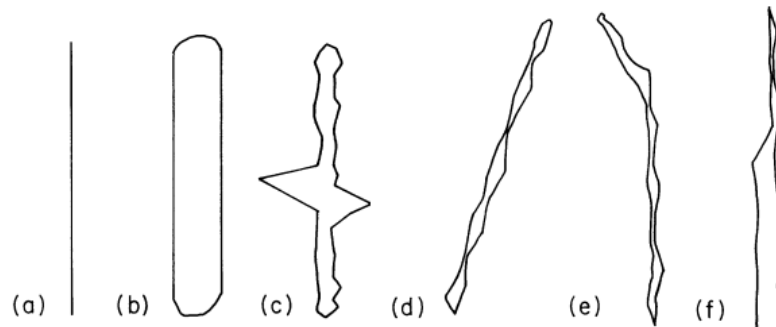
### *2.6.1 Teste Van de Castele para a avaliação e calibração de marégrafos/linígrafos*

No teste Van de Castele são realizadas leituras do nível da água simultâneas a partir do marégrafo e outro equipamento de referência ao longo de um ciclo de maré. As duas leituras devem permanecer constantes, porém, isso só acontece com um marégrafo perfeito. O teste foi concebido para determinar a precisão do marégrafo a partir da construção de um diagrama cuja forma permite identificar falhas (INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, 1985).

No diagrama, o eixo Y é construído com os valores de elevação do mar e o eixo X é construído com os valores do erro do marégrafo, caracterizado pela diferença entre a elevação do mar medido pelo equipamento de referência e a altura do mar no marégrafo. Um hipotético marégrafo perfeito resulta em um diagrama com uma linha vertical centrada em zero. Na prática o diagrama indica a magnitude do erro esperado no registro das elevações. A forma dos diagramas ilustra qualitativamente o tipo de erro envolvido (MIGUEZ; TESTUT; WÖPPELMANN, 2008).

Em um procedimento básico, uma equipe ocupa o lugar do marégrafo com o equipamento de referência durante o período de maré realizando medidas periódicas. A cada momento de medida, o marégrafo testado é lido. As medidas são transformadas em altitudes referenciadas ao *datum* por meio da aplicação de uma constante e o erro aparente do marégrafo é registrado, permitindo a construção do diagrama com cada erro do marégrafo e a elevação do nível da água (LENNON, 1968). A figura 10 mostra os diagramas e o tipo de erro associado.

Figura 10 – Diagramas do teste Van Castelee, onde (a) representa um marégrafo perfeito, (b) indica uma folga no mecanismo do medidor, (c) indica atrito mecânico no mecanismo do marégrafo ou da boia no tubo, (d) indica erro de escala por mau dimensionamento das engrenagens do registrador, do diâmetro do cabo da boia dentre outros, (e) indica erro de escala em parte do registro e (f) indica deslizamentos ou saltos no mecanismo.



Fonte: INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION, 1985.

O teste de Van de Castelee não permite detectar apenas o erro médio, mas também erros de escala, erros de sincronização, erros de mínimas e máximas, etc.

Os procedimentos do teste Van de Castelee também permitem estimar a diferença entre os níveis de referência. Um exemplo é a determinação do “zero da régua”, que caracteriza o nível de referência para as leituras de um linímetro, permitindo a conversão das leituras em valores absolutos (altitudes) ou relativos (desníveis), como mostra a figura 11, que relaciona o desnível entre uma referência de nível e a superfície da água determinado a partir do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância usando uma estação total, e as medidas de um linímetro radar.



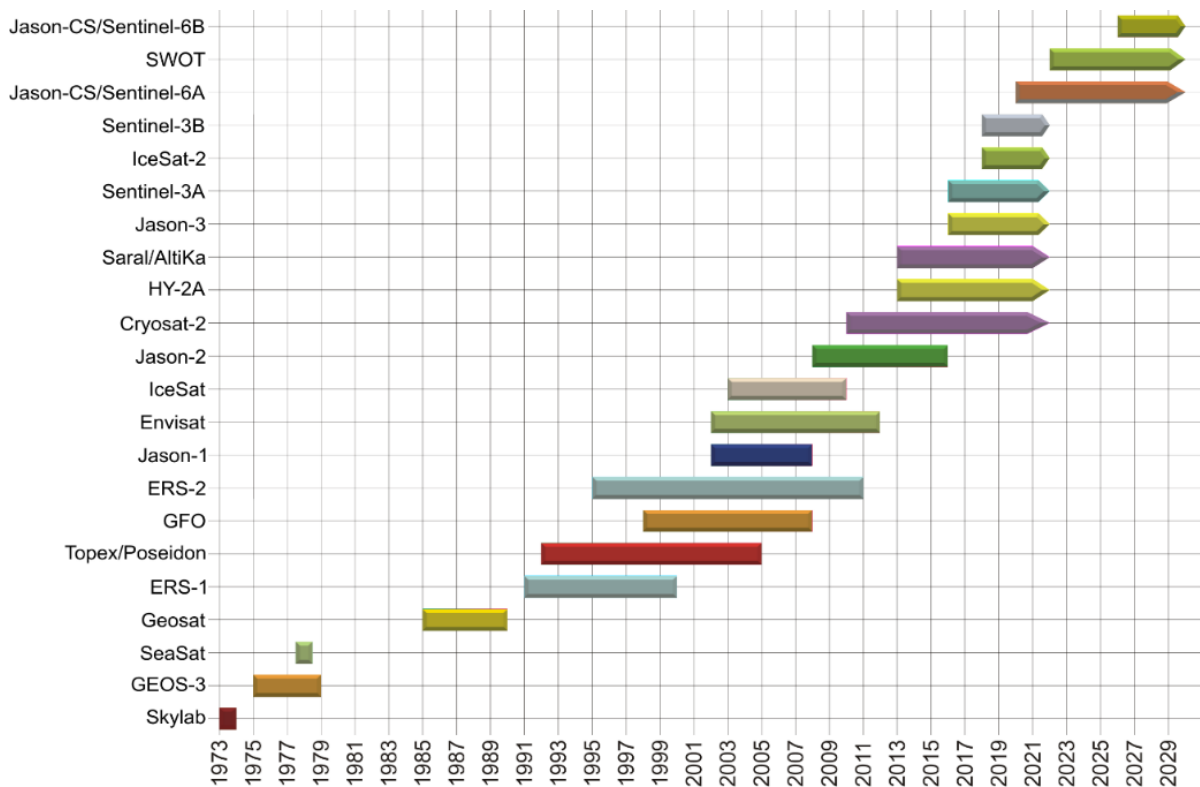
objetivando, principalmente, a medida da altura da superfície do mar, corpos de águas interiores (rios e lagos) e superfície de gelo com uma acurácia de  $\pm 1$  cm (MERTIKAS; KOKOLAKIS, 2021) a partir da tecnologia de radar por meio da transmissão de pulsos curtos de micro-ondas na direção do nadir onde o eco refletido pela superfície é examinado (CALMANT; SEYLER; CRETAUX, 2008) utilizando usualmente frequências na banda C, Ka, Ku, L, P ou S (LUO et al., 2011; OTOSAKA; SHEPHERD; MCMILLAN, 2019; SHEN et al., 2020; ZELLI, 1999). Há também os sensores altímetros orbitais que medem a superfície da água líquida e gelo usando a tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), que usam comprimentos de onda do espectro ótico (SUN, 2017).

O primeiro altímetro foi colocado a bordo do satélite Skylab em 1973 (DENG, 2016) e desde então se desenvolvem missões com sensores altímetros embarcados em plataformas orbitais objetivando o monitoramento dos corpos d'água, sendo recentemente lançadas as missões *Surface Water and Ocean Topography* (SWOT) que trará avanços na cobertura espacial e resolução em altimetria permitindo monitorar níveis e volumes em pequenos corpos d'água em todo o mundo (BIANCAMARIA; LETTENMAIER; PAVELSKY, 2016; GRIPPA et al., 2019) e a missão Sentinel 6/Jason CS (*Continuity of Service*) com dois satélites idênticos voando em sequência, sendo a continuação das missões TOPEX/Poseidon, Jason 1, 2 e 3 (SCHARROO et al., 2016). A figura 12 mostra o histórico das missões orbitais altimétricas.

Os satélites radares altímetros provêm medidas a partir de dois métodos: o *Low Resolution Model* (LRM) e *Synthetic Aperture Radar* (SAR) (MARTIN-PUIG et al., 2010), que tem visada oblíqua e possui várias aplicações. No modo LRM uma forma da onda é construída medindo o sinal refletido conforme ele se espalha radialmente pela superfície (MARTIN-PUIG et al., 2010; STENSENG et al., 2015). O SAR explora os efeitos *Delay/Doppler* no sinal de retorno, oferecendo resolução mais alta pois não depende da distância radial, mas da largura da faixa (DINARDO, 2020; MARTIN-PUIG et al., 2010). Há também o modo *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR) na qual duas ou mais imagens SAR de uma mesma área são usadas para gerar mapas de deformação de superfície ou modelos digitais de elevação (GENS; VAN GENDEREN, 1996). Imagens SAR formadas por uma grade regular de valores complexos, que podem ser decompostas em fases e amplitudes, são denominadas

*Single Look Complex-Synthetic Aperture Radar* (SLC-SAR) (HANSSEN, 2001) e o *Differential InSAR* (DInSAR) é usado para a separação da fase de deslocamento da superfície da fase do terreno (ALVES; KRUEGER; DALAZOANA, 2023). O *Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar* (PSInSAR™) é uma técnica de sensoriamento remoto que usa como base o DInSAR, porém empregando uma série de interferogramas diferenciais provenientes de uma pilha de imagens SLC-SAR (ALVES; KRUEGER; DALAZOANA, 2023).

Figura 12 – Histórico das missões altimétricas orbitais, onde os polígonos representam o início e fim das missões (duração). Polígonos com seta à direita representam missões em prosseguimento até o período de coleta de dados ou a serem lançadas.



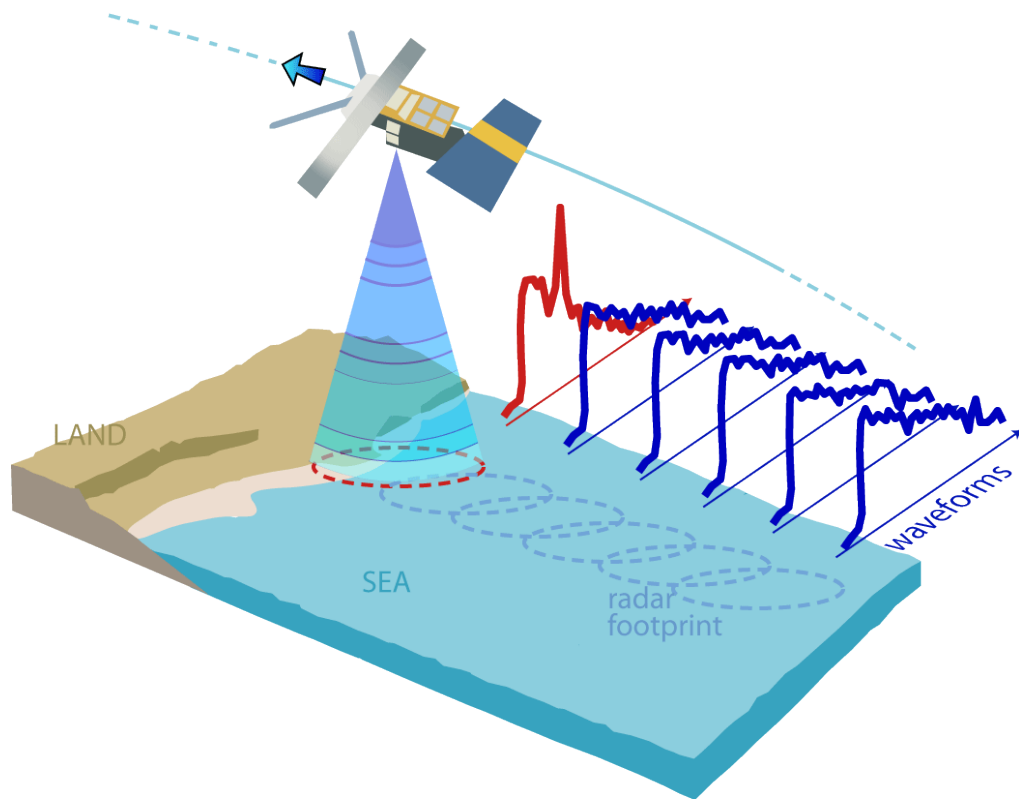
Fonte: VIGNUDELLI et al., 2019.

Os satélites radares altímetros medem a distância satélite-superfície a partir do tempo de ida e volta de um pulso de radar em direção nadiral, observando a amplitude e a forma do sinal de retorno ao longo do seu caminho (trilha), identificando se o alvo



atingido é água, terra ou uma mescla dos dois (contaminação do sinal) como mostra a figura 13.

Figura 13 – Pulso radar e forma da onda, que indica o tipo de alvo e cujo reprocessamento dos dados busca aproximar os pontos da costa.



Fonte: ESA; CNES, 2022.

A relação entre o tempo de transmissão e recepção do sinal ( $\Delta t$ ) e a velocidade com que a luz se propaga no vácuo ( $c$ ) permite determinar a distância satélite-superfície ( $R$ ) usando a equação 12 (FU; CAZENAVE, 2000).

$$R = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (12)$$

As medidas da distância satélite-superfície (Alcance) devem considerar correções de ordem instrumental, de propagação do sinal, ajustes geofísicos externos e correções de superfície.

As correções de ordem instrumental, são o viés do sensor, viés da calibração do ganho na amostra da forma da onda, padrão de ganho da antena, atenuação do

*Automated Gain Control*, deslocamento *doppler*, aceleração de alcance, desvio do oscilador e ângulo do apontador/estado do mar (FU; CAZENAVE, 2000).

Quanto à propagação do sinal, devem ser realizadas as correções da refração atmosférica (ionosfera, troposfera úmida e troposfera seca) que provocam um atraso no sinal de retorno. Enquanto a correção ionosférica leva em consideração o conteúdo de elétrons na atmosfera, principalmente na faixa entre 250 km e 400 km onde estão mais concentrados os elétrons que interferem na propagação do sinal (CALLAHAN, 1984; IMEL, 1994; STAMMER; CAZENAVE, 2017), a correção de troposfera úmida leva em conta a presença de água líquida e vapor d'água na troposfera (DESORTES; OBLIGIS; EYMARD, 2010) e a correção de troposfera seca considera a presença de gases componentes do ar seco na atmosfera e que pode significar erros de até -2,3 m (STAMMER; CAZENAVE, 2017).

Os ajustes geofísicos externos contemplam a aplicação da altura geoidal para a transformação da altitude elipsoidal em altitude ortométrica, a altura das marés e efeitos da pressão atmosférica (FU; CAZENAVE, 2000). Quanto a correção de maré, são incluídos os efeitos denominados de maré terrestre (*solid earth tide*), maré polar (*polar tide*) e maré oceânica (*geocentric tide*). A maré terrestre é a resposta da Terra sólida às forças gravitacionais externas, semelhante aos oceanos, cujas correções são baseadas em potenciais de maré (CARTWRIGHT; EDDEN, 1973; CARTWRIGHT; TAYLER, 1971). A maré polar é gerada por pequenas perturbações no eixo de rotação da Terra e cuja correção leva em conta a localização média precisa dos polos (DESAI; WAHR; BECKLEY, 2015). A maré oceânica é o sinal de maré forçada pelo potencial lunissolar (maré astronômica) e o componente de maré de carga, que por sua vez é o deslocamento do fundo oceânico devido a carga da maré oceânica (STAMMER; CAZENAVE, 2017). As fontes de dados para os valores de marés, para a missão lidar ICESat-2, foram o modelo GOT4.8 desenvolvido pelo *Goddard Space Flight Center* (GSFC-NASA) para a maré oceânica, e as convenções do IERS de 2010 para as marés terrestre e polar. Para corpos de água continentais, a maré astronômica é provavelmente desprezível, sendo a maré meteorológica ou comportamento da superfície da água devido aos ventos e pressão atmosférica mais significativa.

Por fim, duas correções de superfície são aplicadas. O efeito do barômetro inverso que acontece devido as variações na altura da superfície do mar ocasionadas

pelas variações da pressão atmosférica (WUNSCH; STAMMER, 1997) e o viés eletromagnético que se dá devido as diferentes refletividades das cristas e vales da onda, já que os vales refletem de forma mais eficiente o sinal do que as cristas, levando a uma superestimativa da distância satélite-superfície (YAPLEE et al., 1971).

Devido ao lapso de revisita dos satélites altímetros, por exemplo, aproximadamente dez dias para a missão Jason-3, 27 dias para a missão Sentinel e 91 dias para a missão ICESat-2, há um *aliasing* do sinal oceânico de alta frequência, ou seja, os sinais se tornam indistinguíveis quando amostrados além de surgirem frequências múltiplas das indistinguíveis, incluindo a maioria dos sinais de maré e a resposta oceânica ao forçamento atmosférico, principalmente a pressão e os ventos (STAMMER; CAZENAVE, 2017). As medições altimétricas devem ser corrigidas dos efeitos dos ventos, pressão atmosférica e sinais de maré para evitar confusão com os sinais de escala temporal maior (STAMMER; CAZENAVE, 2017), como o El Niño oscilação Sul (ENOS) ocasionado pela anomalia da temperatura da superfície do mar (ATSM) no Pacífico tropical, ou seja, o El Niño é a própria ATSM (SOPPA; SOUZA; PEZZI, 2011).

A determinação da órbita ou altitude do satélite em relação ao elipsoide é realizada via efeito doppler (DORIS), GNSS ou laser. A aplicação das correções e determinação precisa da órbita dos satélites permitem atingir um valor de *Root Mean Square Error* (RMSE) entre 1 cm e 2 cm na observação do nível da água (PLAG; PEARLMAN, 2009). O SSH é calculado a partir da equação 13 enquanto o princípio é ilustrado pela figura 14.

$$h^{\text{SSH}} = h^{\text{SAT}} - R - C_o \quad (13)$$

Onde:  $h^{\text{SSH}}$  = Altitude elipsoidal do nível da água;

$h^{\text{SAT}}$  = Altitude elipsoidal do sensor altímetro;

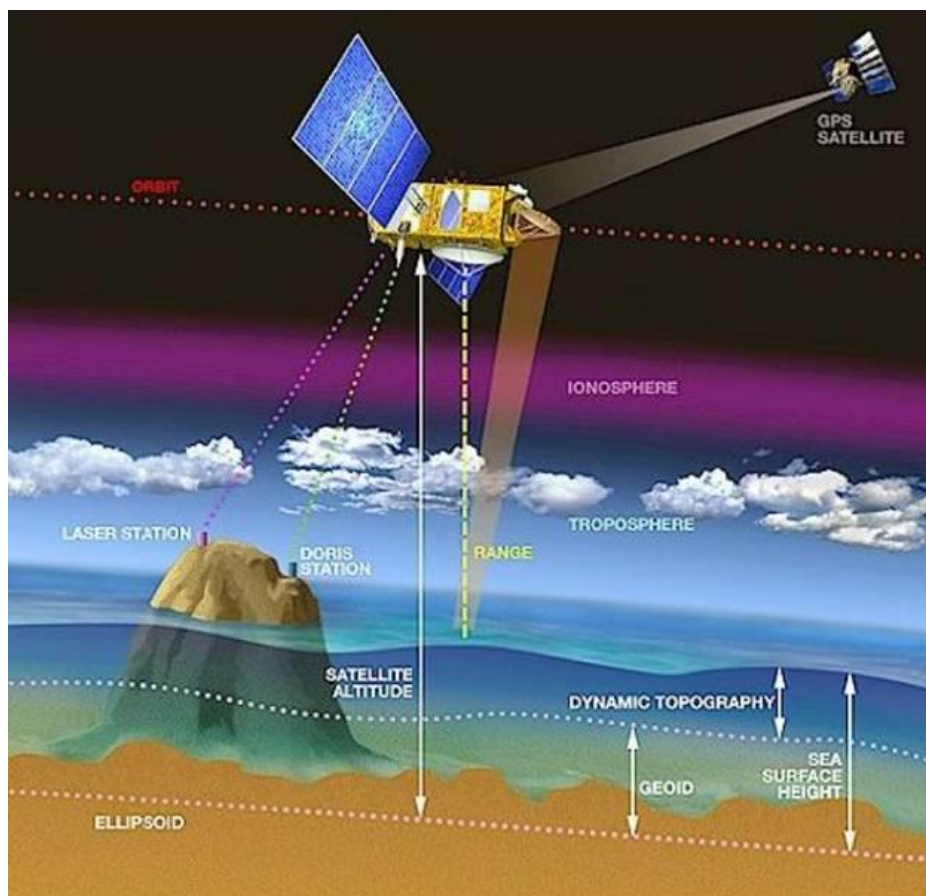
$R$  = *Range* (Alcance);

$C_o$  = *Corrections* (Correções);

Constantes melhorias nos dados altimétricos são aplicadas para seu uso em regiões costeiras e corpos de água continentais a partir do reprocessamento dos sinais. Os métodos de reprocessamento destes sinais são denominados “*retracking*”, cujos algoritmos tem o objetivo de recuperar parâmetros geofísicos, como a distância

satélite-superfície por exemplo, a partir do ajuste de um modelo às formas da onda observadas (GOMMENDINGER et al., 2011). Alguns exemplos de algoritmos são o *Offset Center of Gravity* (OCO<sub>G</sub>), também conhecido como Ice/Ice-1 (TOURAIN et al., 2021), o *SAR Altimetry Mode Studies and Applications* (SAMOSA) (DINARDO, 2020) e o *Maximum Likelihood Estimator* (MLE).

Figura 14 – Princípios de determinação da Altitude do satélite, do alcance (distância sensor-superfície) e SSH.



Fonte: EUMETSAT; CLS; AVISO, 2022.

Os sensores lidar são semelhantes aos sensores radar em sensoriamento remoto, com a diferença de usarem comprimentos de onda ao nível ótico, por isso, o sinal lidar não penetra nuvens densas ou solo como o radar (SUN, 2017). Para aplicações em batimetria e recuperação da altura do nível da água são usados sensores operantes na faixa do espectro da luz no azul e verde (RENSLOW, 2012) enquanto sensores operantes na faixa do infravermelho não produzem sinal de

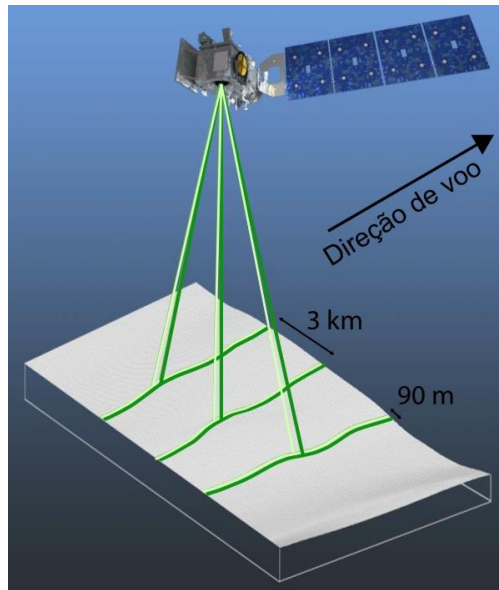
retorno quando interagem com a superfície da água sem vegetação e partículas suspensas (PAULA, 2017).

Os sensores podem ter vários feixes e receptores para aumentar a cobertura. Três tipos de sensores são os mais usados (SUN, 2017): Lidars de elevação da superfície, que registram e analisam os dados da superfície e são geralmente chamados de altímetros laser; Lidars de retroespalhamento da atmosfera, que registram de forma contínua o retroespalhamento das moléculas e partículas à medida que os pulsos laser se propagam na atmosfera; Lidars de absorção espectral, que medem o retorno da superfície ou atmosfera em comprimentos de onda específicos para análise da constituição do objeto na qual houve a interação.

Como princípio de funcionamento, é medido o tempo de propagação do pulso laser, de ida e de volta, na qual se mede a distância satélite-superfície. A altitude da superfície da água é obtida a partir da distância satélite-superfície e da posição do sensor em órbita no momento da medida, em relação ao centro de massa da Terra. A resolução espacial depende do tamanho da pegada do laser, determinada pela divergência do ângulo do feixe laser e pela altitude do sensor, enquanto a cobertura é determinada pela taxa de repetição do pulso laser, espaçamento da órbita e duração da missão (SUN, 2017). Devido ao comprimento de onda curto, os feixes laser podem ser colimados em um ângulo de divergência bem mais estreito, resultando em menor pegada na superfície, na ordem de dezenas de metros de diâmetro (SUN, 2017). Um fator limitante é o retroespalhamento da atmosfera dos pulsos de laser adjacentes, que podem corromper os retornos da superfície (SUN, 2017), onde para a atmosfera da Terra, isso limita a taxa de pulso do laser a cerca de 10 kHz. A posição da órbita e o ângulo de apontamento são determinados por rastreadores estelares, giroscópios e outros métodos de rastreamento (DORIS, Laser) e GNSS (FRAPPART et al., 2021; SUN, 2017).

A altitude da superfície na intersecção do feixe laser e a superfície da Terra pode ser resolvida usando a lei dos cossenos já que a posição do satélite no espaço, o ângulo de apontamento e a distância satélite-superfície são conhecidos (SUN, 2017). A figura 15 mostra um exemplo de satélite lidar altímetro multifeixe, neste caso, o ICESat-2.

Figura 15 – Princípio de operação do satélite Lidar altímetro multifeixe (ICESat-2).



Fonte: NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER, 2023

A precisão da medição lidar é afetada principalmente pela relação sinal-ruído do receptor, que tem natureza quântica de detecção da luz e no ruído eletrônico do pré-amplificador, que geralmente é a fonte dominante (SUN, 2017). Supõe-se que a reflexão da superfície seja uniforme em todas as direções (Lambertiano) e que o ângulo de divergência do feixe laser seja menor que o campo de visão do receptor (FOV) para que o detector veja toda a pegada do laser na superfície (SUN, 2017).

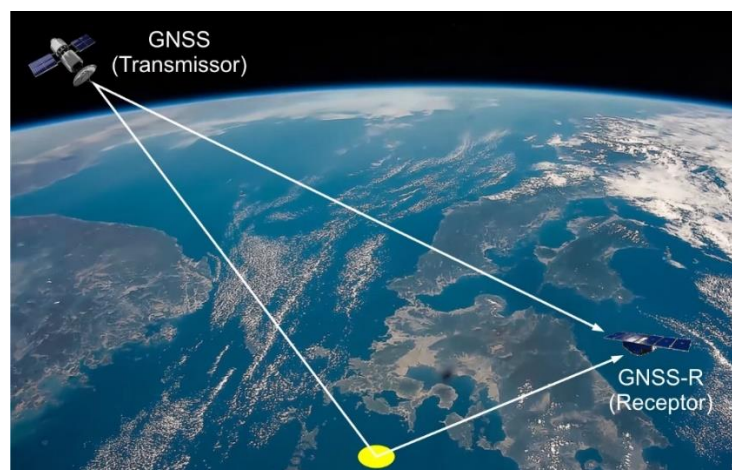
O primeiro sensor lidar usado no espaço foi desenvolvido pelos Estados Unidos nas missões Apollo 15 a 17 no início dos anos 1970 (SJOGREN; WOLLENHAUPT, 1973). Desde então vários sistemas lidar foram desenvolvidos para a investigação das superfícies de planetas, asteroides e da Lua.

Os sensores lidar para a medida da superfície da Terra foram desenvolvidos na mesma época dos sensores planetários, porém, com o desafio de terem precisões similares aos sensores terrestres, mas com restrições quanto ao tamanho, massa e consumo de energia (SUN, 2017). Para validar a tecnologia foram realizados experimentos com sensores aerotransportados, como o *Lidar Airbone Topographic Mapper* (ATM) para o monitoramento do gelo na Groelândia e posteriormente o monitoramento de zonas costeiras, mantos de gelo, etc (BROCK et al., 2002) e muitas missões espaciais foram propostas (BUFTON, 1989, 1991).

O primeiro sensor lidar em órbita da Terra foi o *Geoscience Laser Altimeter System* – GLAS na missão ICESat, lançado em 2003, com a missão completada em 2009 e provendo dados com precisão na altitude da superfície entre 2 e 3 cm (ABSHIRE et al., 2005; SCHUTZ et al., 2005; WANG et al., 2011; ZWALLY et al., 2002). Atualmente, para o monitoramento da superfície das águas oceânicas e continentais, há o sensor *Advanced Topographic Laser Altimeter System* – ATLAS na missão ICESat-2, lançada em 2018. O ATLAS possui três pares de feixes Laser de alta taxa de pulso e detecção de fótons no comprimento de onda de 532 nm, operando na faixa do verde (FRAPPART et al., 2021).

O GNSS-R foi proposto em 1988 para aplicações difusométricas multiestáticas quando havia apenas o sistema GPS disponível (HALL; CORDEY, 1988) e a proposta para uso em altimetria oceânica foi sugerida pela primeira vez em 1993 (MARTINEIRA, 1993), sendo uma técnica semelhante ao sensoriamento remoto por radar bistático, onde transmissor e receptor ficam separados por uma considerável distância, podendo ser adaptado para sinais refletidos e transmitidos pelos satélites do GNSS (MALIK; BHATTI, 2015), podendo operar como um altímetro ou um difusômetro (FAGUNDES et al., 2021; ZAVOROTNY et al., 2014). Tem aplicação na determinação da velocidade e direção dos ventos oceânicos (GARRISON et al., 2019), altimetria oceânica (LI et al., 2016), detecção da umidade do solo, profundidade da neve e conteúdo de água na vegetação (LARSON, 2016). A figura 16 mostra o princípio de aquisição de dados do GNSS-R.

Figura 16 – Princípio de aquisição de dados GNSS-R.



Fonte: Elaboração própria.

Algumas missões GNSS-R orbitais são o *United Kindon Survey Satellite Technology Ltd* (UK SSTL) com o *Technology Demonstration Satellite 1* (TechDemoSat-1/TDS-1) de 2014, o *Cyclone GNSS* (CYGNSS) da *National American Space Agency* (NASA) de 2016 e os nanosatélites 3Cat-2 da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) lançados a partir de 2018 (FABRA et al., 2017) além do UK-DMC (CLARIZIA et al., 2009), BUFENG-1 A/B *Twin Satellite* (JING et al., 2019), *Spire CubeSats* (JALES et al., 2020), *ESA FSSCAT CubeSats* (LLAVERIA et al., 2021), FS-7R (TSAI; LIN; JUANG, 2018), *ESA PRETTY* (DIELACHER et al., 2019) e *SNOOPI* (GARRISON et al., 2020). Os sensores orbitais também tem potencial para serem usados como complemento às estações terrestres para o monitoramento de lagos, principalmente com as novas missões GNSS-R sendo lançadas tendo melhor qualidade de dados, resolução espacial e temporal (XU et al., 2019).

Os registros do nível da água também podem ser obtidos a partir de centros de processamento que utilizam os dados dos satélites altímetros para estabelecerem estações altimétricas virtuais. No monitoramento de corpos hídricos continentais há o *Database for Hydrological Time Series on Inland Waters* (DAHITI) e o *Copernicus Global Land Service* (CGLS).

O DAHITI foi desenvolvido pelo Instituto Alemão de Pesquisa em Geodésia da Universidade Técnica de Munique (*Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut ut der Technischen Universität München – DGFI-TUM*) em 2013 para fornecer séries temporais do nível da água de corpos hídricos continentais. Os valores são extraídos a partir do método baseado na rejeição de outliers estendida a uma abordagem do filtro de Kalman, incorporando dados altimétricos multimissão de calibração cruzada, incluindo suas incertezas (SCHWATKE et al., 2015).

O *Copernicus Global Land Services* faz parte do *Land Monitoring Core Service* (LMCS) do programa europeu de observação da Terra Copernicus. Disponibiliza uma série de produtos, dentre eles, séries temporais do nível da água de corpos hídricos continentais a partir dos satélites altímetros utilizando os dados das missões Jason-3 e Sentinel-3 (TABURET et al., 2020). As missões Topex/Poseidon, Jason-1, Jason-2, Envisat, SARAL/AltiKa, ICESat e GFO também são usadas para o estabelecimento da série temporal (TABURET et al., 2020). Para a obtenção das altitudes e coordenadas horizontais os valores médios e desvio padrão são calculados, eliminando os pontos com valores superiores a 1,5 vezes a média. O desvio padrão e



a média são recalculados, sendo removidas as medições com duas vezes o desvio padrão. Quatro iterações são usadas para remover possíveis pontos anormais (TABURET et al., 2020).

## **2.8 Métodos terrestres de nivelamento**

A altimetria estuda os métodos e instrumentos utilizados para a determinação e representação do relevo da superfície terrestre. O conjunto de operações realizadas para a determinação de altitudes, cotas ou diferença de nível entre dois pontos é denominado levantamento altimétrico ou nivelamento (SEGANTINE; SILVA, 2015).

Na literatura destacam-se alguns métodos de nivelamento como o geométrico, o trigonométrico, o taqueométrico e o barométrico. Outros métodos possibilitam a determinação da diferença de nível de forma indireta (a partir das altitudes), pois não são medidos diretamente os desníveis, como por exemplo o GNSS e o Laser.

No nivelamento taqueométrico utilizam-se os fios estadimétricos para a determinação indireta da distância e o ângulo vertical medido para o cálculo do desnível entre dois pontos. O nivelamento barométrico baseia-se na diferença de pressão atmosférica entre dois pontos. São dois métodos que podem ser usados em levantamentos exploratórios, porém, não são recomendados em trabalhos que exijam alta acurácia.

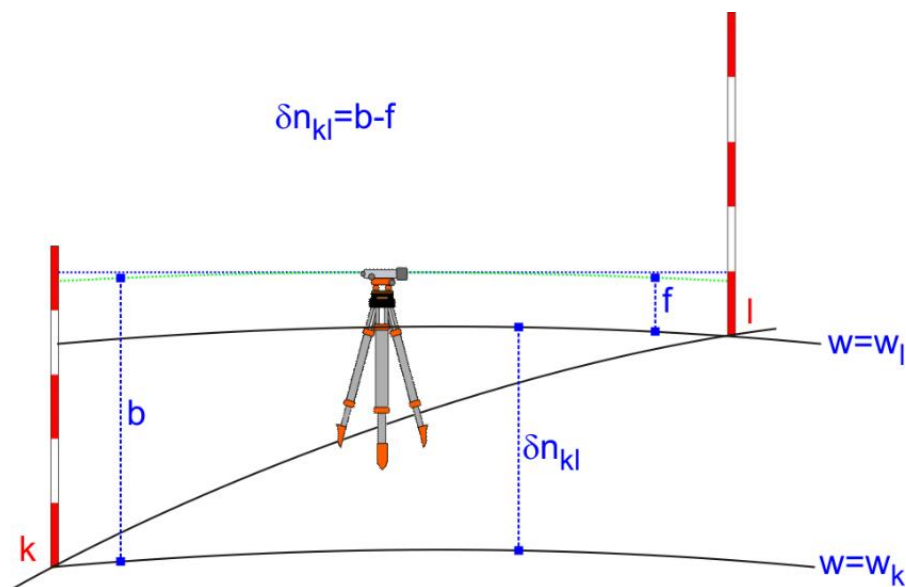
Pelo GNSS a obtenção da diferença de nível se dá a partir da diferença de altitudes, tendo que ter o cuidado de transformar as altitudes elipsoidais obtidas em altitudes que estejam referenciadas a uma superfície relacionada ao campo de gravidade terrestre (ortométrica por exemplo), além disso, há limitações quando usado em áreas densamente urbanizadas ou vegetadas. O nivelamento Laser é o nivelamento geométrico que, ao invés de visada óptica, utiliza radiação Laser para leitura em réguas graduadas.

Para aplicações técnicas e científicas, os métodos terrestres do nivelamento geométrico e nivelamento trigonométrico são preferíveis, tanto pela facilidade quanto pela praticidade na aplicação em campo.

### 2.8.1 O nivelamento geométrico

O nivelamento geométrico é um método utilizado em geodésia e topografia que permite a determinação do desnível entre dois pontos sobre a terra (CASACA; DE MATOS; DIAS, 2000; ESPARTEL, 1965; PRÉVOT, 1900). É efetuado a partir de um nível ótico estacionado sobre um tripé entre duas miras graduadas conforme mostra a figura 17.

Figura 17 – Princípio do nivelamento geométrico, onde o nível é estacionado entre os pontos k e l, e a diferença de nível ( $\delta n_{kl}$ ) é determinada por uma simples operação de subtração.



Fonte: ESPARTEL, 1965; TORGE, 2001.

O desnível total entre duas referências de nível, supondo duas estações k e l ( $\Delta H_{kl}^{RN} = \Delta n_{kl}$ ) é o somatório dos desníveis de cada lance de visada executado ao longo da linha de nivelamento geométrico ( $\delta n_{i, i+1}$ ), demonstrado pela equação 14 (TORGE, 2001).

$$\Delta H_{kl}^{RN} = \Delta n_{kl} = \sum_{i=k}^l \delta n_{i, i+1} \quad (14)$$

Em aplicações mais específicas, como o estabelecimento de redes altimétricas nacionais e controle de grandes obras de engenharia, é necessário o uso do

nivelamento geométrico de precisão com miras rígidas dotadas de escalas em invar (liga metálica com baixo coeficiente de dilatação térmica) e nível dotado de micrômetro ou níveis eletrônicos específicos, com resolução de leitura na ordem de 0,01 mm ou melhor (CASACA; DE MATOS; DIAS, 2000).

Alguns erros que afetam o nivelamento geométrico ótico são:

- Não horizontalidade da linha de colimação;
- Assentamento do tripé e miras em superfícies de pouca estabilidade;
- Efeitos atmosféricos (refração e incidência solar);
- Efeitos da curvatura da Terra;
- Precisão nominal dos níveis.

Os efeitos conjugados da curvatura terrestre e da refração atmosférica causam erros sistemáticos de aproximadamente 0,8 mm em um lance de nivelamento de 100 m (YANG; ZOU, 2021). A própria precisão dos níveis é uma fonte importante dos erros sistemáticos, que podem ser maiores ou menores de acordo com sua classificação. Para aplicações geodésicas, utilizam-se níveis óticos mecânicos ou eletrônicos com precisão relativa igual ou melhor a 0,4 mm/km (IBGE, 2017). Níveis considerados de baixa precisão, para fins topográficos, têm precisão relativa igual ou maior a 10 mm/km (ABNT, 1994).

O desnível entre dois pontos dependerá do caminho percorrido, pois trajetórias diferentes resultam em valores de fechamento diferentes devido há alguns fatores como o não paralelismo das superfícies equipotenciais por exemplo, ou seja, as soluções não são unívocas. Este tipo de situação se observa em linhas maiores que aproximadamente 10 km (FREITAS; BLITZKOW, 1999). Neste caso é possível aplicar um ajustamento ao nivelamento geométrico dado pela média ponderada de nivelamentos geométricos diretos dados pela equação 15, onde  $w_i$  representa o peso aplicado aos desníveis.

$$\Delta H_{kl}^{RNA} = \frac{\sum_{i=k}^l w_i \cdot \Delta H_{kl}^{RN}}{\sum_{i=k}^l w_i} \quad (15)$$

Quando os extremos da linha de nivelamento estão muito afastados, quando se desenvolvem no sentido norte-sul e quando o desnível é acentuado, é necessária uma correção de natureza gravimétrica aos desníveis observados (CASACA; DE

MATOS; DIAS, 2000). Esta correção, de não paralelismo das superfícies equipotenciais, é importante no nivelamento geométrico para fins geodésicos. Para evitar a dependência do desnível com o caminho percorrido, é aplicada uma compensação gravimétrica usando a equação 16, onde  $\Delta H_{kl}^{RNC}$  é o desnível corrigido e  $g_i$  a gravidade (TORGE; MÜLLER, 2012).

$$\Delta H_{kl}^{RNC} = \frac{\sum_{i=k}^l g_i \cdot \delta n_{i, i+1}}{\sum_{i=k}^l g_i} \quad (16)$$

O controle de qualidade das linhas de nivelamento geométrico é normalmente realizado sobre o erro de fechamento, que é comparado à uma tolerância. Quando o erro excede a tolerância, as medições são rejeitadas e as observações da linha de nivelamento são repetidas (CASACA; DE MATOS; DIAS, 2000). No Brasil estas tolerâncias são apresentadas nas especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro (IBGE, 2017) e na norma brasileira NBR13.133 (ABNT, 1994, 2021).

Na definição clássica, o nivelamento geométrico tinha como objetivo o transporte de altitude a partir dos desníveis observados. No Brasil, por exemplo, até 2018 aplicava-se apenas as correções do não paralelismo das superfícies equipotenciais nas linhas de nivelamento, gerando a altitude normal-ortométrica (IBGE, 2019). Modernamente se utiliza o conceito de número geopotencial. Os números geopotenciais (C) servem de base para o cálculo das altitudes que se vinculam de forma rigorosa ao campo de gravidade terrestre. Se ao longo do nivelamento for medida a gravidade em cada ponto, determina-se o número geopotencial a partir da equação 17 (IBGE, 2019).

$$C_P = W_0 - W_P = \int_0^P g dH \approx \sum_{i=1}^K (g_m^{obs} \Delta H^{obs}) \quad (17)$$

Onde  $C_p$  é o número geopotencial no ponto P,  $W_0$  é o geopotencial no ponto de referência,  $W_P$  é o geopotencial no ponto P,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\Delta H$  é o desnível.

Desta forma uma rede altimétrica pode ser reajustada com números geopotenciais. A transformação de números geopotenciais em desníveis supondo dois pontos i e j, se dá por meio da equação 18 adaptada de (IBGE, 2019), onde  $g$  é a gravidade associada ao tipo de altitude a ser calculada.

$$\Delta H_{ij} = \frac{C_j}{g_j} - \frac{C_i}{g_i} \quad (18)$$

Os nivelamentos geométricos são conduzidos em seções, linhas e circuitos. As seções são conduzidas em duplo nivelamento (nivelamento e contranivelamento), as linhas são formadas por seções e os circuitos são formados por linhas formando polígonos fechados, que são então ajustados. O ajustamento é realizado por meio do método dos mínimos quadrados paramétrico, dos correlatos ou combinado (GEMAEL, 1994).

Dependendo da finalidade, o nivelamento geométrico pode ser financeiramente custoso, pois para aplicações geodésicas exige equipamentos de alta precisão (níveis com precisão relativa nominal melhor que 0,4 mm/km) e acessórios especiais (micrômetros, miras de invar, etc.) caros, além da manutenção de equipes de campo e todas as despesas inerentes (estadia, alimentação, deslocamento, etc.). O processo de nivelamento geométrico também é moroso, com a necessidade de seguir alguns procedimentos específicos para que se obtenha boa qualidade no levantamento, como por exemplo comprimentos máximos e mínimos de visada, condições atmosféricas, dentre outros. Dependendo da região onde são desenvolvidos os trabalhos de nivelamento geométrico, também há os perigos envolvendo assaltos e a própria integridade física das equipes que, quando os trabalhos são desenvolvidos ao longo de rodovias, estão sujeitas a atropelamentos.

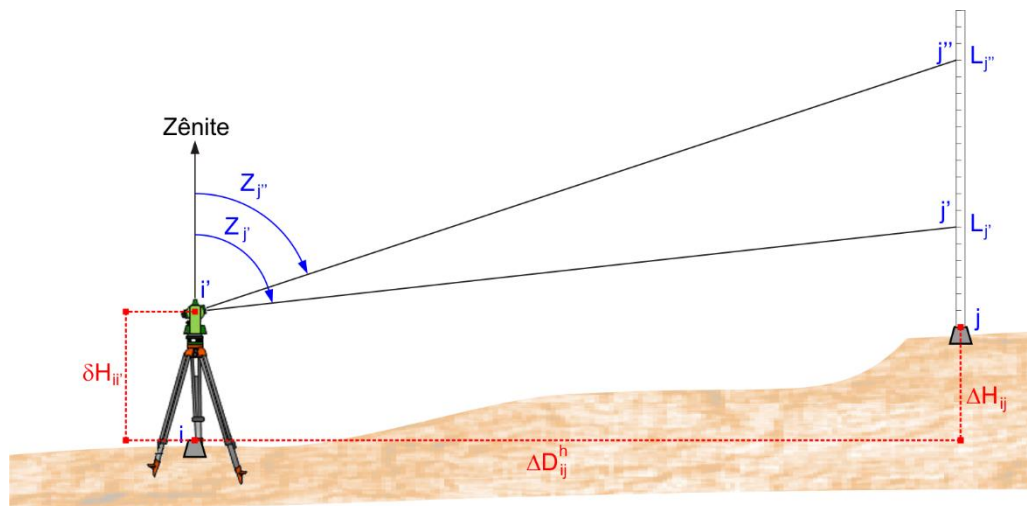
Embora seja preciso para lances curtos, à medida que o nivelamento geométrico avança, a precisão vai se degradando. Porém, é o método de transporte de altitude terrestre mais preciso.

### 2.8.2 O nivelamento trigonométrico

O nivelamento trigonométrico é constituído de operações que objetivam a determinação da diferença de nível a partir da resolução de um triângulo usando relações trigonométricas (ESPARTEL, 1965; PRÉVOT, 1900; SEGANTINE; SILVA, 2015). O método pode ser classificado em nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância e nivelamento trigonométrico com medida direta de distância. Para minimizar erros sistemáticos, é possível aplicar ao nivelamento trigonométrico técnicas especiais como a de *Leap-Frog*, eliminando a etapa de medida de altura do equipamento (estação total ou teodolito).

No nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância, a distância é calculada a partir de leituras em réguas graduadas. Com o teodolito ou estação total instalado sobre um ponto  $i$ , é visada uma mira sobre um ponto  $j$ , onde são efetuadas leituras de altura nos pontos  $j'$  ( $L_{j'}$ ) e  $j''$  ( $L_{j''}$ ) além das distâncias zenitais (ângulos verticais com origem no zênite) respectivas ( $Z_{j'}$  e  $Z_{j''}$ ) e altura do instrumento ( $\delta H_{ii'}$ ), conforme mostra a figura 18.

Figura 18 – Nivelamento trigonométrico com medida indireta da distância a partir das leituras na mira ( $L$ ) e medidas da distância zenital ( $Z$ ) nos pontos  $j'$  e  $j''$ .



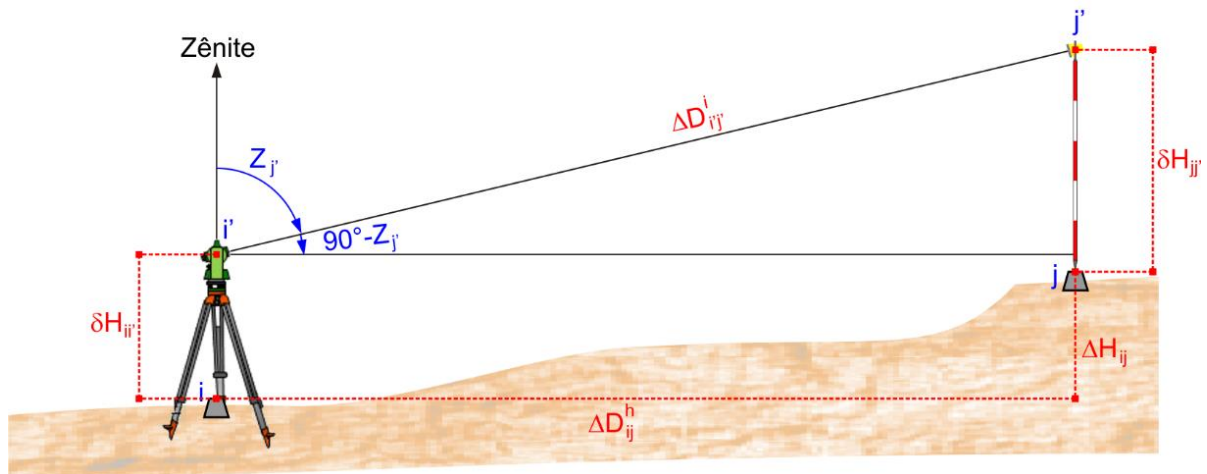
Fonte: Elaboração própria.

O desnível entre os dois pontos ( $\Delta H_{ij}$ ) é dado pela equação 19, onde ( $\Delta D_{ij}^h$ ) é a distância horizontal entre os dois pontos.

$$\Delta H_{ij} = \cos Z_{j'} \cdot \left[ \frac{(L_{j''} - L_{j'}) \cdot \text{sen} Z_{j''}}{\text{sen}(Z_{j'} - Z_{j''})} \right] + \delta H_{ii'} - L_{j'} = \Delta D_{ij}^h \cdot \cotan Z_{j'} + \delta H_{ii'} - L_{j'} \quad 19$$

No nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, a distância é medida a partir de uma estação total até um refletor (prisma) instalado sobre um bastão. Também é possível realizar a medida de distância sem prisma se a estação total possuir este recurso. Supondo o equipamento instalado sobre um ponto  $i$ , é visado um bastão com refletor sobre um ponto  $j$ , onde é efetuada a medida de distância inclinada direta no ponto  $j'$  ( $\Delta D_{ij'}^i$ ), da distância zenital ( $Z_{j'}$ ), da altura do instrumento ( $\delta H_{ii'}$ ) e da altura do refletor ( $\delta H_{jj'}$ ), conforme a figura 19.

Figura 19 – Nivelamento trigonométrico com medida direta da distância a partir de um refletor (prisma) e medidas da distância zenital ( $Z$ ) no ponto  $j'$ .



Fonte: Elaboração própria.

A diferença de nível entre os dois pontos a partir do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância ( $\Delta H_{ij}$ ) é dada pela equação 20.

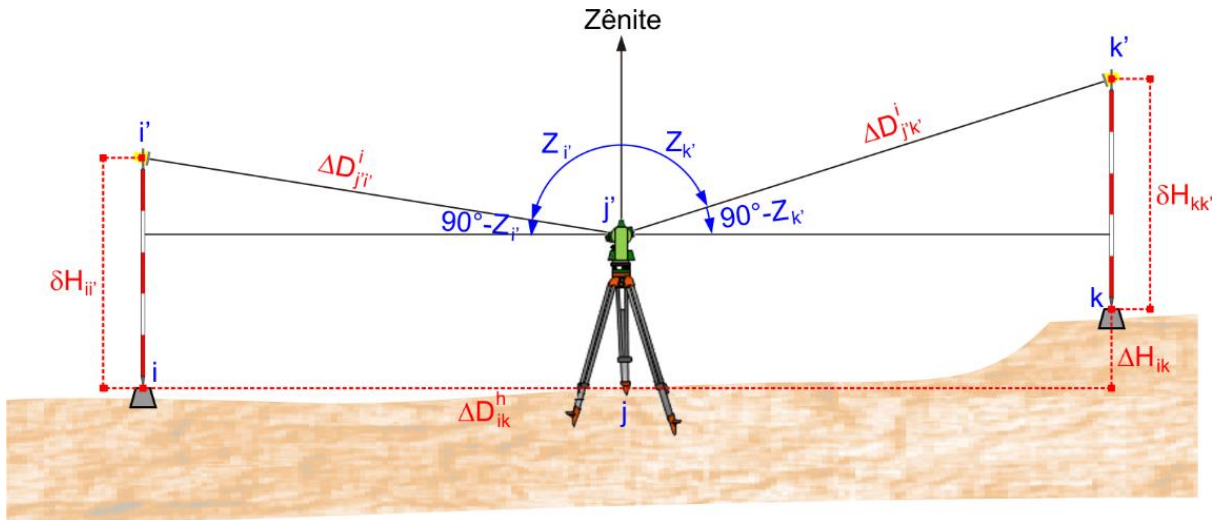
$$\Delta H_{ij} = \cos Z_{j'} \cdot \Delta D_{i'j'}^i + \delta H_{i'} - \delta H_{j'} \quad 20$$

A tomada da altura do centro ótico da estação total a partir de uma trena pode se tornar uma importante fonte de erro sistemático. Para minimizar o problema, pode ser usada a técnica *Leap-Frog*, que é uma forma de executar o nivelamento trigonométrico onde a estação total é instalada entre os pontos a serem nivelados, semelhante ao nivelamento geométrico. Usando esta técnica não é necessária a medida da altura do instrumento, sendo também possível anular os efeitos da refração atmosférica e curvatura terrestre se mantida uma equidistância entre os pontos e não variar demasiadamente o ângulo vertical.

A Universidade de New Brunswick, no Canadá, realizou experiências variando a técnica, alcançando acurácia na ordem de  $2\text{mm} \cdot \sqrt{k}$  (método UNB) (CHRZANOWSKI, 1989).

A figura 20 mostra o desenho esquemático da técnica *Leap-Frog* aplicada ao nivelamento trigonométrico com medida direta de distância.

Figura 20 – Nivelamento trigonométrico com medida direta de distância usando a técnica *Leap-Frog*, onde a estação total fica estacionada entre os dois pontos a se determinar o desnível.



Fonte: Elaboração própria.

O desnível entre os pontos i e k é calculado a partir da equação 21.

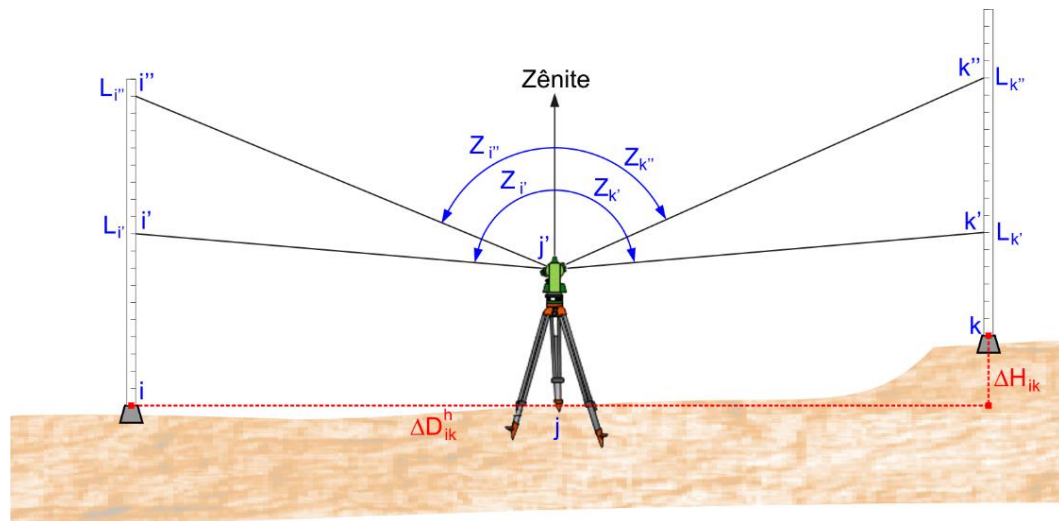
$$\Delta H_{ik} = \cos Z_{k'} \cdot \Delta D_{jk'}^i - \cos Z_{i'} \cdot \Delta D_{ji'}^i + \delta H_{ii'} - \delta H_{kk'} \quad 21$$

Onde  $Z_{i'}$  e  $Z_{k'}$  são as distâncias zenitais das visadas aos pontos  $i'$  e  $k'$ ;  $\Delta D_{ji'}^i$  e  $\Delta D_{jk'}^i$  são as distâncias inclinadas das visadas aos pontos  $i'$  e  $k'$ ;  $\delta H_{ii'}$  e  $\delta H_{kk'}$  são as alturas do refletor nas estações  $i$  e  $k$  respectivamente.

Também é possível aplicar o nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância à técnica *Leap-Frog*. O procedimento é semelhante ao método do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, porém, ao invés do uso de bastão e refletor, são realizadas leituras na mira à ré e à vante, como mostra a figura 21.



Figura 21 – Nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância (com leituras na mira) usando a técnica *Leap-Frog*.



Fonte: Elaboração própria.

A diferença de nível é calculada a partir da equação 22.

$$\Delta H_{jk} = \frac{(L_{i''} - L_{i'}) \cdot \cot Z_{i'}}{\cot Z_{i''} - \cot Z_{i'}} - \frac{(L_{k''} - L_{k'}) \cdot \cot Z_{k'}}{\cot Z_{k''} - \cot Z_{k'}} + L_{i'} - L_{k'} \quad 22$$

Os erros associados ao nivelamento trigonométrico são oriundos principalmente dos efeitos da curvatura terrestre, da refração atmosférica e de natureza instrumental. A correção do erro conjugado da curvatura da Terra e da refração é dada pela equação 23 (SEGANTINE; SILVA, 2015).

$$C = (1 - k) \cdot \frac{(\Delta D^h)^2}{2 \cdot R_T} \quad 23$$

Onde  $k$  é o coeficiente de refração ( $\cong 0,13$ ),  $\Delta D^h$  é a distância horizontal e  $R_T$  o raio da Terra.

Os erros instrumentais podem ser eliminados ou reduzidos usando algumas práticas no processo de medida. O erro de colimação aplicado ao ângulo vertical, na qual o zero não coincide com o zênite, pode ser minimizado usando a média de duas posições (posição direta -  $Z_n^{PD}$  e posição inversa -  $Z_n^{PI}$ ) usando a equação 24.

$$Z_n = \frac{Z_n^{PD} + (360^\circ - Z_n^{PI})}{2} \quad 24$$

## 2.9 Métodos hidrográficos de nivelamento

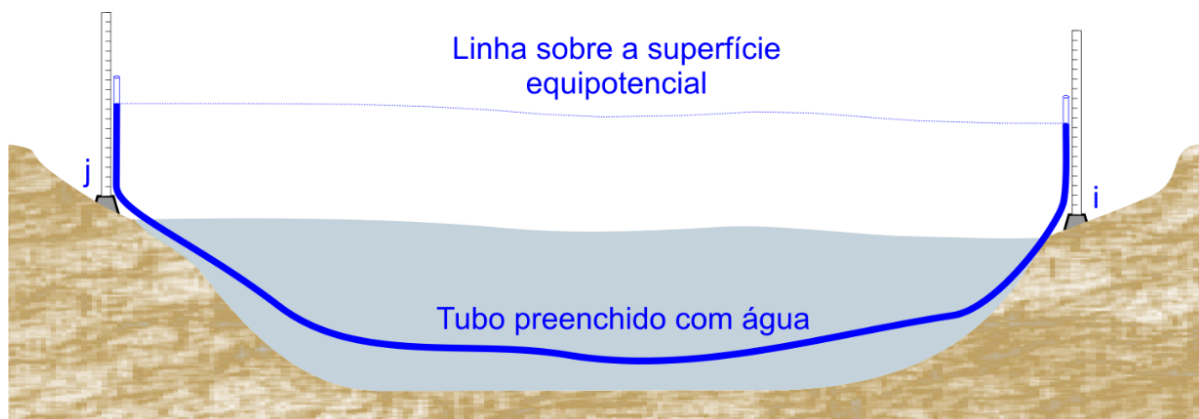
O nivelamento hidrográfico caracteriza-se pela determinação do desnível entre dois pontos sobre a superfície da água, no interior ou entre as margens de um corpo hídrico (oceanos, mares, rios, lagos, etc.). Existem basicamente dois métodos de nivelamento hidrográfico: o nivelamento hidrostático e o nivelamento hidrodinâmico.

O nivelamento hidrográfico pode ser uma opção interessante para a determinação de desníveis entre duas referências de nível terrestres, quando separadas por um corpo hídrico. O nivelamento hidrográfico pode, inclusive, ser uma opção ao nivelamento geométrico para grandes distâncias, principalmente quando a topografia da superfície da água é determinada com o auxílio de sensores altímetros orbitais.

### 2.9.1 O nivelamento hidrostático

O nivelamento hidrostático baseia-se no princípio dos vasos comunicantes (TORGE, 2001). Um tubo ou conjunto de tubos interconectados, cheios de água ou outro líquido (sem bolhas de ar e com temperatura uniforme) é colocado entre as margens do corpo hídrico a ser transposto (LIIBUSK, 2013; TORGE, 2001). O nível da água ou outro líquido observado nas extremidades do tubo indica a mesma superfície equipotencial como mostra a figura 22 para um sistema de tubo único e superfícies livres.

Figura 22 – Sistema de nivelamento hidrostático básico de tubo único entre dois pontos às margens de um corpo hídrico.



Fonte: Elaboração própria.

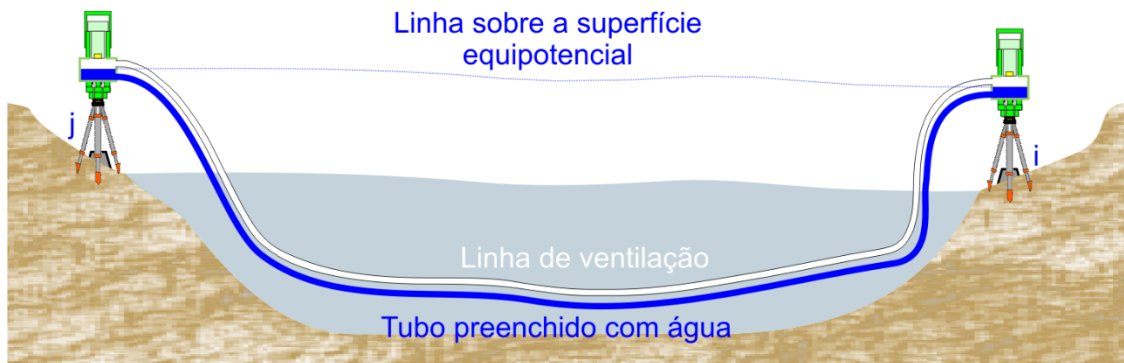
O método foi usado principalmente entre as décadas de 1950 até 1970 (LIIBUSK, 2013). Como exemplo do uso do método, pode ser citado o nivelamento hidrostático de 2 km executado no *Als Fjord* (JESSEN, 1968) e o nivelamento hidrostático executado no cinturão de *Fehmarn*, no mar báltico até uma distância de 20 km (ANDERSEN; GRABOWSKI; REMMER, 1990), ambos na Dinamarca. Outro exemplo foi a aplicação do método na conexão de seis ilhas Frísias com o continente (WAALEWIJN, 1964).

O nivelamento hidrostático, apesar de ser tecnicamente sofisticado (LIIBUSK, 2013), geralmente é considerado com precisão suficiente para a execução de nivelamentos de segunda ordem (CRUMRINE; PALMER, 1951; HURST; BILHAM, 1986) cujo valor é de  $\pm 1,3\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$  (VANICEK; CASTLE; BALAZS, 1980). O método está associado a alguns erros (SNEDDON, 1972) como:

- Efeitos da temperatura na densidade do líquido;
- Outros efeitos na densidade do líquido;
- Correntes de convecção dentro do tubo hidrostático;
- Resistência ao cisalhamento inicial do líquido;
- Alteração da inclinação da superfície equipotencial;
- Oscilações do corpo líquido em torno da sua posição de equilíbrio;
- Diferenças de pressão do ar nas extremidades;
- Efeitos do menisco nas superfícies livres;
- Mudanças de volume do tubo hidrostático.

Alguns autores dizem que o nivelamento hidrostático atinge precisão de primeira ordem ( $\pm 0,5\text{mm}/\sqrt{\text{km}}$ ) (LIIBUSK, 2013). Talvez esta precisão possa ser alcançada usando sistemas de nivelamento hidrostático mais sofisticados como o sistema fechado de tubo duplo apresentado na figura 23, onde além do tubo com o líquido também há um tubo adicional de ventilação usado para compensar os efeitos da pressão do ar (MEIER et al., 2010).

Figura 23 – Sistema de nivelamento hidrostático fechado de tubo duplo entre dois pontos às margens de um corpo hídrico.



Fonte: Elaboração própria.

O método não é viável devido ao alto custo e sensibilidade à fatores temporais e mudanças espaciais nas condições ambientais, com precisão na ordem de 1 cm para distâncias de até 10 km (LIIBUSK, 2013).

### 2.9.2 O nivelamento hidrodinâmico

O método ideal para a integração de referenciais altimétricos separados por grandes corpos de água é o nivelamento hidrodinâmico/oceânico (AFRASTEH et al., 2021). Tradicionalmente, ilhas próximas são conectadas ao sistema altimétrico continental por nivelamento hidrostático, porém a técnica é muito cara, consome bastante tempo e tem limitação de até 20 km (SLOBBE et al., 2018). O GNSS/Nivelamento (sobre a terra) não tem limitação de distância, mas depende da qualidade dos modelos geoidais (SLOBBE et al., 2018).

No nivelamento hidrodinâmico (também conhecido como nivelamento geostrófico) a altitude é transportada sobre a superfície da água a partir do próprio nível da água reduzido à topografia da superfície do mar (TORGE; MÜLLER, 2012), em outras palavras, o nivelamento hidrodinâmico é executado a partir da diferença de nível do MDT ou MSS, que permite determinar a diferença de nível entre dois pontos em um corpo de água, caracterizados por estações altimétricas virtuais, linímetros ou qualquer outra forma de obtenção do nível da superfície da água. Para isso é necessário um modelo hidrodinâmico, que pode ser determinado a partir de uma abordagem oceânica levando-se em consideração a velocidade da água, o arrasto do

vento, a profundidade da água, o atrito com o fundo, a pressão atmosférica, a densidade da água, a gravidade e a força de coriolis (TORGE; MÜLLER, 2012). Também pode se usar uma abordagem geodésica, utilizando dados de satélites altímetros e marégrafos na costa, ou uma abordagem híbrida oceanográfica/geodésica. Um exemplo de aplicação do método foi realizado na costa britânica do canal da mancha (70km) e no mar báltico entre a Alemanha e a Dinamarca (CARTWRIGHT; CREASE, 1963; WÜBBELMANN, 1992), alcançando precisão de aproximadamente 1 cm.

O nivelamento hidrodinâmico usa os desníveis entre dois pontos sobre o MDT ou o ADT (que pode ser um modelo ou as próprias trilhas dos satélites altímetros) para promover o transporte de altitudes de acordo com a equação 25 (usando o MDT como exemplo), para duas estações altimétricas virtuais  $i$  e  $j$  na superfície da água, ilustrado pela figura 24.

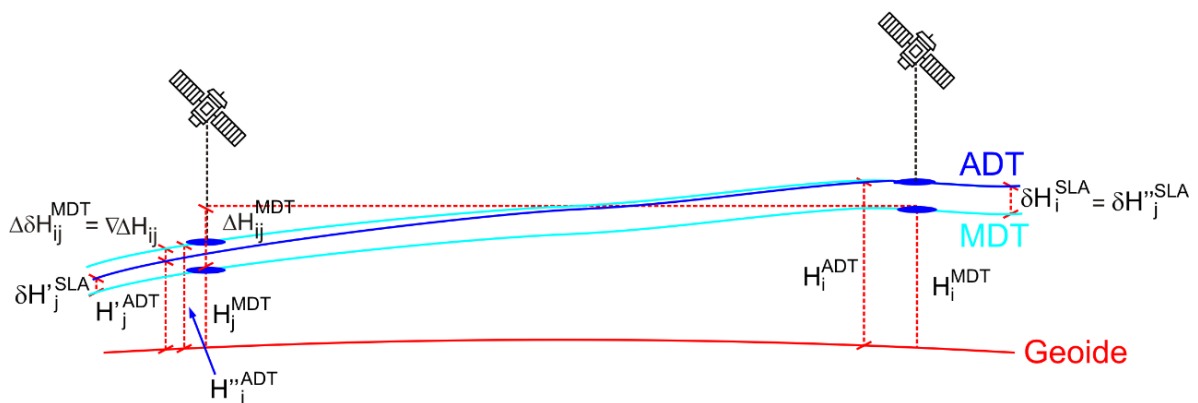
$$\Delta H_{ij}^{\text{MDT}} = H_j^{\text{MDT}} - H_i^{\text{MDT}} \quad (25)$$

Onde:  $\Delta H_{ij}^{\text{MDT}}$  = Desnível entre dois pontos sobre o MDT;

$H_j^{\text{MDT}}$  = Altitude ortométrica média do MDT na estação de chegada;

$H_i^{\text{MDT}}$  = Altitude ortométrica média do MDT na estação de partida.

Figura 24 – Elementos do nivelamento hidrodinâmico, onde a diferença de nível sobre a superfície da água é a diferença de altitudes entre dois pontos, neste caso, altitudes ortométricas (referenciadas ao geóide).



Fonte: Elaboração própria.

$\nabla\Delta H_{ij}$  é a discrepância entre o desnível sobre o MDT e sobre o ADT, considerando as soluções para as estações  $i$  e  $j$  independentes, determinada a partir dos dados dos satélites altímetros e do modelo geoidal. Neste caso, as SLA e, conseqüentemente, a diferença não é nula ( $\delta H_i^{SLA} \neq \delta H_j^{SLA} \therefore \Delta H_{ij}^{SLA} \neq 0$ ). Na figura 20 é possível perceber que a discrepância é igual a diferença de SLA entre as estações  $i$  e  $j$ , que é dada pela equação 26.

$$\nabla\Delta H_{ij} = \Delta\delta H_{ij}^{SLA} = \Delta\delta H_{ij}^{ADT} - \Delta\delta H_{ij}^{MDT} = \delta H_j^{SLA} - \delta H_i^{SLA} \quad (26)$$

Para executar o nivelamento hidrodinâmico usando medidas instantâneas do nível da água, as superfícies ADT e MDT são consideradas paralelas ( $\Delta H_{ij}^{MDT} = \Delta H_{ij}^{ADT}$ ), logo, os valores de SLA são considerados iguais nas estações  $i$  e  $j$  ( $\delta H_i^{SLA} = \delta H_j^{SLA} \neq 0$ ), com  $\Delta H_{ij}^{SLA} = 0$  e a discrepância  $\nabla\Delta H_{ij}$  um dos erros do método. Na prática, ao invés de utilizar um ADT poderia ser usado um MDT com período curto de observações (horas, dias ou meses), e quanto maior for o período de observação do nível da água, menor será a discrepância já que a média dos ADTs tendem ao MDT e conseqüentemente o SLA tende a 0 ( $\Delta H_{ij}^{ADT} \rightarrow \Delta H_{ij}^{MDT} | \Delta H_{ij}^{SLA} \rightarrow 0$ ), pois ADT e SLA variam temporal e espacialmente enquanto o MDT varia apenas espacialmente.

Se nas estações altimétricas virtuais e linímetros são usadas as médias ADT, isto pode ser considerado um método de determinação do MDT (MDT3) com nível de processamento diferente, com leituras pontuais dos satélites altímetros ou régua ao nível de processamento L2P. Um modelo MDT geral (MDT2), pré-interpolado, seria caracterizado ao nível de processamento L3. Desta forma, a fórmula para o nivelamento hidrodinâmico ficaria conforme apresentado na equação 27. A discrepância seria calculada a partir da equação 28 ou pela notação proposta por Gregory et al., 2019, na equação 29.

$$\Delta H_{ij}^{MDT} = (H_i^{MDT2} - H_i^{MDT3}) + (H_j^{MDT2} - H_i^{MDT2}) \quad (27)$$

$$\nabla\Delta H_{ij}^{MDT} = \Delta H_{ij}^{MDT2} - \Delta H_{ij}^{MDT3} \quad (28)$$

$$\nabla\Delta \bar{H}_{ij}^w = \Delta \bar{H}_{ij}^{w2} - \Delta \bar{H}_{ij}^{w3} \quad (29)$$

O termo nivelamento hidrodinâmico parece ser mais adequado quando se usa a abordagem oceanográfica para a determinação da superfície da água. Neste caso,

usando a abordagem geodésica com o auxílio de dados altimétricos orbitais para a determinação da altura da superfície da água, prefere-se utilizar o termo nivelamento hidrográfico orbital.

## **2.10 Ajustamento das observações**

Toda e qualquer observação que se realiza se caracteriza pela inevitável presença de erros, seja por falha humana, imperfeição do equipamento ou influência das condições ambientais onde se efetuam as medidas (GEMAEL, 1994). Sabendo desta condição, as medidas são realizadas com superabundância de observações, surgindo o problema de como obter um resultado que seja único e que possa representar de forma consistente a grandeza medida. O ajustamento de observações pode estimar o valor da grandeza e a precisão em função da solução utilizada.

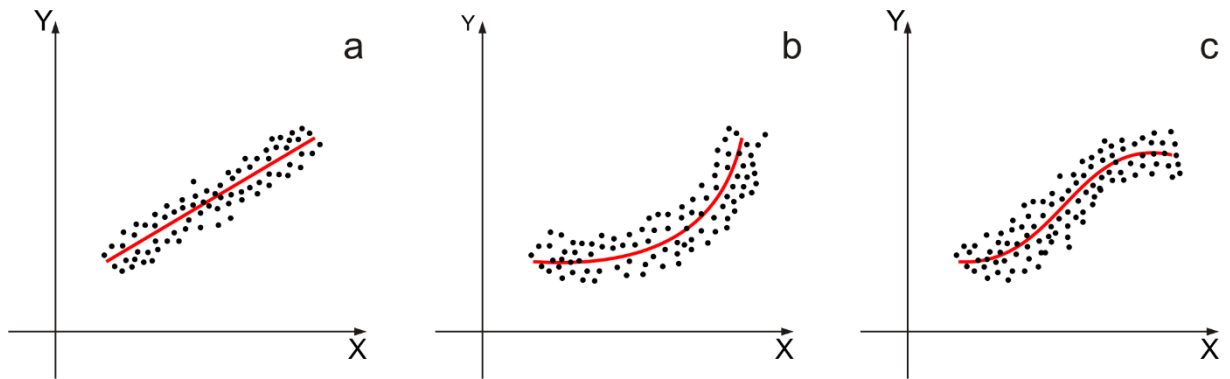
Em casos mais simples o ajustamento é realizado sobre as próprias grandezas incógnitas. Em outros casos, sobre a grandeza que se vincula a essas grandezas incógnitas, denominados parâmetros. Isto é feito para que se possa eliminar as inconsistências que se vincula às observações, ou seja, ajustando-as em função de um modelo matemático (GEMAEL, 1994).

### *2.10.1 Ajustamento de curvas pelo método dos mínimos quadrados*

Na medida das alturas da superfície da água durante a passagem dos satélites altímetros, é estabelecida uma relação entre duas variáveis, a posição do ponto medido e a altura da superfície neste ponto. A relação entre estas duas variáveis são expressas sob a forma matemática a partir de uma equação (SPIEGEL, 1985).

O conjunto de observações de campo são colocadas em um sistema de coordenadas cartesianas, resultando em um diagrama de dispersão. A partir do diagrama de dispersão é possível visualizar uma curva regular que se aproxime dos dados, curva esta denominada ajustamento (SPIEGEL, 1985). Quando os dados estão próximos de uma linha reta, há uma relação linear, caso contrário, a relação é não linear. A figura 25 mostra três possibilidades de ajustamento, uma linear (figura 25A), e duas não lineares (figuras 25B e 25C).

Figura 25 – Exemplos de ajustamento linear (a) e não linear (b e c).



Fonte: Elaboração própria.

As equações 30, 31, 32, 33 e 34 mostram respectivamente aos ajustamentos linear, parabólico (2º. Grau), polinômio de 3º. Grau, polinômio de 4º. Grau e, genericamente, polinômio de n graus.

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X \quad (30)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 \quad (31)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 \quad (32)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + a_4 \cdot X^4 \quad (33)$$

$$Y = a_0 + a_1 \cdot X + a_2 \cdot X^2 + a_3 \cdot X^3 + a_4 \cdot X^4 \dots + a_n \cdot X^n \quad (34)$$

As equações podem ser determinadas a partir do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados que, por definição, procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados entre o valor estimado e os dados observados (resíduos) (SPIEGEL, 1985).

Matricialmente, a estimativa dos parâmetros é realizada a partir da equação 35, traduzida pela equação 36.

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{k2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{kn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \dots \\ a_k \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$\vec{X} = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \vec{B} \quad (36)$$



Onde  $\vec{X}$  é o vetor dos parâmetros,  $A$  é a matriz  $m \times n$  das variáveis explicativas ( $m$  observações e  $n$  variáveis) e  $\vec{B}$  é o vetor das variáveis dependentes.

### 2.10.2 O critério de informação de Akaike

A escolha do melhor ajustamento, ou seja, que melhor se adapte ao conjunto de dados, pode usar diversos critérios para a seleção de modelos (BOZDOGAN, 1987). Um destes critérios, baseado no máximo da função de verossimilhança (MFV), é o critério de informação de Akaike ou *Akaike information criterion* (AIC).

O critério de informação Akaike foi desenvolvido por Hirotugu Akaike em 1973, que propôs utilizar a informação de *Kullback-Leibler* (K-L) para a seleção de modelos, estabelecendo uma relação entre a máxima verossimilhança e a informação K-L. É uma medida relativa de qualidade de ajuste de um modelo estatístico estimado. O valor de AIC é dado pela equação 37 (HU, 2007).

$$AIC=2 \cdot k+n \cdot \ln(\sigma^2) \quad (37)$$

Onde  $k$  é o número de parâmetros do modelo (2 para modelos lineares, 3 para modelos parabólicos, 4 para funções de grau 3, etc.),  $n$  é o número de observações e  $\sigma^2$  é a variância do conjunto de dados.

Por si só o valor de AIC para um determinado conjunto de dados não tem qualquer significado, mas se torna útil quando são comparados diversos modelos. O modelo com menor valor de AIC é o “melhor” modelo dentre os comparados (EMILIANO et al., 2009).

### 2.10.3 Ajustamento do nivelamento geométrico

O nivelamento geométrico pode ser ajustado a partir da compensação do erro de fechamento, proporcional ao número de estações, a distância entre elas ou desnível absoluto. Também pode ser efetuado o ajustamento de forma rigorosa, utilizando o método dos mínimos quadrados.

A compensação do erro de fechamento proporcional ao número de desníveis obtidos (método do número de desníveis) é dada pela equação 38 (SEGANTINE; SILVA, 2015).

$$C_{H_i} = \frac{C_H}{n} \quad (38)$$

Onde  $C_{H_i}$  é o valor da compensação parcial do desnível (i),  $C_H$  é o valor total a ser compensado e  $n$  é a quantidade de desníveis medidos.

A compensação em função da distância (método dos pesos das distâncias) é calculada a partir da equação 39 (SEGANTINE; SILVA, 2015).

$$C_{H_i} = C_H \cdot \frac{d_i}{\sum d_i} \quad (39)$$

Onde  $d_i$  é a distância aproximada do desnível.

Em função do valor absoluto de cada desnível, a compensação é realizada a partir da equação 40 (SEGANTINE; SILVA, 2015).

$$C_{H_i} = C_H \cdot \frac{|\Delta H_i|}{\sum |\Delta H_i|} \quad (40)$$

Onde  $\Delta H_i$  é o valor do desnível (i).

A correção das altitudes é realizada aplicando a equação 41 (SEGANTINE; SILVA, 2015).

$$H_i = H_{i-1} + \Delta H_{i-1,i} + C_{H_i} \quad (41)$$

Estes métodos são, geralmente, aplicados à linhas de nivelamento que não exigem ajustamentos rigorosos, não sendo possível determinar alguns parâmetros estatísticos, como a incerteza na determinação dos desníveis por exemplo.

Para nivelamentos geodésicos ou que exijam alto grau de acurácia e controle rigoroso de qualidade (determinação das incertezas), o levantamento deve ser desenvolvido em forma de rede, formando figuras fechadas e aplicando o MMQ a partir dos métodos paramétrico, dos correlatos ou combinado.

No método paramétrico ou método das equações de observação são usadas as observações (parâmetros), onde os valores ajustados são expressos como uma função dos parâmetros ajustados [ $L_a = F(X_a)$ ] (GEMAEL, 1994). A equação 42 dá os valores do vetor correção  $X$ .

$$X = -(A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot P \cdot L_{obs} \quad (42)$$

Onde  $A$  é a matriz das derivadas parciais dos parâmetros,  $P$  é a matriz de pesos e  $L_{obs}$  o vetor dos valores observados. Os valores dos parâmetros ajustados  $X_a$  são dados pela equação 43 (GEMAEL, 1994).

$$X_a = X_0 + X \quad (43)$$

Onde  $X_0$  é o vetor dos parâmetros aproximados. A matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados é calculada a partir da equação 44 (GEMAEL, 1994).

$$\sum X_a = \sigma_0^2 \cdot (A^T \cdot P \cdot A)^{-1} \quad (44)$$

Onde  $\sigma_0^2$  é a variância a priori.

No método dos correlatos ou método das equações de condição não são envolvidos os parâmetros, mas somente as observações sujeitas a conhecidas injunções matemáticas (GEMAEL, 1994). Tratam-se de observações diretas sujeitas a equações de condição, onde o afastamento de tais condições é caracterizado pelo erro de fechamento que deverá ser eliminado no ajustamento. Por exemplo, em um nivelamento geométrico conduzido ao longo de um circuito fechado, a soma de todos os desníveis deveria ser, teoricamente, nula. As falhas nos processos de medida, entretanto, também introduzem um erro de fechamento (GEMAEL, 1994). O modelo matemático  $[F(L_a)=0]$  caracteriza as observações condicionadas.

O cálculo do ajustamento se inicia com a determinação do vetor dos multiplicadores de Lagrange a partir da equação 45.

$$K = -(B \cdot P^{-1} \cdot B^T)^{-1} \cdot W \quad (45)$$

Onde  $B$  é a matriz das derivadas parciais das observações,  $P$  é a matriz de pesos e  $W$  o vetor dos erros de fechamento. O vetor de resíduos é dado pela equação 46 e o vetor das leituras ajustadas pela equação 47.

$$V = P^{-1} \cdot B^T \cdot K \quad (46)$$

$$L_a = L_b + V \quad (47)$$

Onde  $L_b$  são as leituras (observações) brutas oriundas do campo. A matriz variância-covariância das observações ajustadas é calculada a partir da equação 48.

$$\sum L_a = \sigma_0^2 \cdot P^{-1} \cdot (I - B^T \cdot M^{-1} \cdot B \cdot P^{-1}) \quad (48)$$

Onde I é uma matriz identidade com as dimensões da matriz de pesos e M é dado pela equação 49.

$$M=B \cdot P^{-1} \cdot B^T \quad (49)$$

O método combinado é a união dos métodos paramétrico e dos correlatos, onde os valores ajustados seguem o modelo matemático  $[F(L_a, X_a)=0]$ . Os valores do vetor de correção são dados pela equação 50.

$$X=-\left(A^T \cdot M^{-1} \cdot A\right)^{-1} \cdot A^T \cdot M \cdot W \quad (50)$$

O vetor dos multiplicadores de Lagrange é determinado a partir da equação 51.

$$K=-M^{-1} \cdot (A \cdot X+W) \quad (51)$$

As equações do resíduo e vetor das leituras ajustadas já foram apresentadas nas equações 46 e 47 respectivamente. A matriz variância-covariância dos parâmetros e dos valores observados ajustados são dados pelas equações 52 e 53.

$$\sum X_a = \hat{\sigma}_0^2 \cdot (A^T \cdot M^{-1} \cdot A)^{-1} \quad (52)$$

$$\sum L_a = \hat{\sigma}_0^2 (P^{-1} - P^{-1} \cdot B^T \cdot M^{-1} \cdot B \cdot P^{-1}) \quad (53)$$

O cálculo da variância da observação de peso unitário à posteriori usa a equação 54 (GEMAEL, 1994).

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T \cdot P \cdot V}{S} = \frac{X^T \cdot A^T \cdot P \cdot I + I^T \cdot P \cdot I}{S} \quad (54)$$

Onde  $S = r$  é o número de equações de condição ou número de observações superabundantes ou número de graus de liberdade, calculado a partir da equação 55.

$$S=r=n-u \quad (55)$$

Sendo n o número de observações e u o número de incógnitas.

## 2.11 Parâmetros de análise e avaliação dos resultados

Na análise, avaliação e validação de dados podem ser usados parâmetros estatísticos, testes de hipótese, parâmetros normalizados ou comparação entre métodos.

Os parâmetros estatísticos estão relacionados a determinação das incertezas em um conjunto de dados medidos, geralmente pela dispersão dos valores das observações em torno da média, como o desvio padrão e o erro padrão por exemplo.

Os testes de hipóteses, testes estatísticos ou testes de significância permitem aceitar ou não uma hipótese estatística a partir de evidências fornecidas por um conjunto de amostras. São usadas, por exemplo, para avaliar a qualidade de um ajustamento conduzido através do método dos mínimos quadrados. Alguns exemplos de estatísticas de teste são o teste F de Sender, t de student e qui-quadrado ( $\chi^2$ ).

Os parâmetros normatizados são usados para comparar dados estatísticos apresentados em normas, como ISO (*International Organization for Standardization*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), com os valores alcançados por um conjunto de dados observados. Para a aprovação da solução avaliada no critério de aceitabilidade das normas, seu valor deve estar dentro dos limites estabelecidos.

Na comparação entre métodos, a solução dada por um novo método é comparada a solução de um método de referência, consagrado e cujos resultados são consistentes e validados, tanto na teoria quanto na prática. A avaliação é realizada em termos de discrepância entre os valores, que para serem considerados válidos, não devem ser muito divergentes dos critérios de aceitabilidade estabelecidos em forma de normas ou parâmetros estatísticos.

### 2.11.1 Incerteza

Para observações superabundantes, considera-se a média como o valor mais provável de uma grandeza, porém, os erros ainda persistem, principalmente os erros aleatórios desde que tenham sido minimizados os erros sistemáticos e eliminados os erros grosseiros. Por isso, além do valor médio estimado de uma grandeza, é estimada também sua incerteza. A incerteza é apresentada em termos de dispersão dos dados em torno da média. As medidas de dispersão mais comuns são a amplitude total, o desvio médio, a amplitude semi-interquartílica, a amplitude entre os centis 10-90 e o desvio padrão (SPIEGEL, 1985).

A incerteza é um parâmetro de qualidade que permite avaliar os dados de forma quantitativa, podendo ser calculada por meio do desvio padrão, populacional ( $\sigma$ ) ou amostral ( $s$ ) conforme as equações 56 e 57 respectivamente.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (56)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (57)$$

Onde  $x_i$  é cada observação,  $\mu$ , a média populacional,  $N$  o número de observações da população,  $\bar{x}$  é a média amostral e  $n$  o número de observações da amostra.

Talvez, o desvio padrão da média (erro padrão) ou o erro quadrático médio (EQM) retorne valores mais realísticos de incerteza. Para estimar o desvio padrão da média (equação 58) é necessário conhecer o desvio padrão populacional, porém, este é um parâmetro desconhecido na maioria das aplicações, podendo ser substituído pelo desvio padrão amostral. O EQM é dado pela equação 59.

$$\sigma_{m\acute{e}dia} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (58)$$

$$EQM = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (59)$$

Onde  $\sigma$  é o desvio padrão populacional ou desvio padrão amostral  $s$ , e  $n$  o número de observações. Na equação 59  $Y_i$  é o valor observado e  $\hat{Y}_i$  é o valor previsto.

Durante a marcha de cálculo, a partir de valores com as incertezas conhecidas aplicados às equações inerentes às grandezas que estejam sendo determinadas, as novas incertezas são calculadas a partir da lei de propagação de erros usando a fórmula geral apresentada na equação 60, para  $Y=f(a, b, c, \dots, k)$ .

$$\sigma_Y^2 = \left(\frac{\partial Y}{\partial a}\right)^2 \cdot \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b}\right)^2 \cdot \sigma_b^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c}\right)^2 \cdot \sigma_c^2 + \dots + \left(\frac{\partial Y}{\partial k}\right)^2 \cdot \sigma_k^2 \quad (60)$$

### 2.11.2 Testes estatísticos

Antes do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados é arbitrada uma variância ( $\sigma_0^2$ ) e após o ajustamento é obtido um valor de variância a posteriori ( $\hat{\sigma}_0^2$ ). A comparação entre  $\sigma_0^2$  e  $\hat{\sigma}_0^2$  pode indicar a qualidade do ajustamento, ou seja, se houver discrepância entre os dois valores, o teste de hipótese baseado na distribuição  $\chi^2$

(equação 61) deve ser realizado para verificar se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança (GEMAEL, 1994). Se for, existe problema no ajustamento.

$$\chi_{\text{calculado}}^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot u \quad (61)$$

Que é comparado aos valores teóricos  $\chi_{v,\alpha/2}^2$  e  $\chi_{v,1-\alpha/2}^2$ , onde  $v$  são os graus de liberdade, dados pela equação 56 já apresentada, e  $\alpha$  é o nível de significância. Testa-se a hipótese básica ( $H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$ ) contra a hipótese alternativa ( $H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$ ). A hipótese básica não é rejeitada se  $\chi_{v,1-\alpha/2}^2 < \chi_{\text{calculado}}^2 < \chi_{v,\alpha/2}^2$ . Se a hipótese básica for rejeitada, o ajustamento deve ser reanalisado, podendo haver erro na MVC das observações, resíduos grandes, modelo matemático não consistente, sistema mal condicionado, etc. (GEMAEL, 1994), ou mesmo o critério para os pesos pode não ser adequado.

Em pequenas amostras ( $N < 30$ ) pode ser usado o teste t de student (SPIEGEL, 1985). Para comparar dois conjuntos de dados independentes, calcula-se a estatística t a partir da equação 62, testando-se a hipótese básica ( $H_0: \mu_1 = \mu_2$ ), ou seja, que as médias populacionais sejam iguais, contra a hipótese alternativa ( $H_0: \mu_1 \neq \mu_2$ ).

$$t_{\text{calculado}} = \frac{\bar{x}_2 - \bar{x}_1}{\sqrt{s^2 \cdot \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}} \quad (62)$$

Onde  $\bar{x}_1$  e  $\bar{x}_2$  são as médias dos conjuntos de dados 1 e 2 respectivamente,  $s^2$  é a variância ponderada,  $n_1$  e  $n_2$  são os números de observações nos conjuntos de dados 1 e 2 respectivamente. A variância ponderada é dada pela equação 63, onde  $S_1^2$  e  $S_2^2$  são as variâncias dos conjuntos de dados 1 e 2 respectivamente.

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (63)$$

Para  $n_1 + n_2 - 2$  graus de liberdade e um nível de significância  $\alpha$ , a hipótese básica não é rejeitada se  $t_{\text{calculado}} < t_{\text{tabelado}}$ .

### 2.11.3 Avaliação a partir das normas

Como parâmetro de validação de classificação para a aplicação dos métodos, podem ser utilizadas as especificações para o nivelamento geométrico geodésico e

topográfico contidas nas especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro (IBGE, 2017) e também na norma brasileira NBR13.133 (ABNT, 1994, 2021).

Pela norma do IBGE, há três classes de nivelamento geométrico para fins geodésicos, sendo duas científicas e uma fundamental. As classes científicas são o controle geodésico de estações maregráficas e vinculação entre estações maregráficas, e a classe fundamental é a densificação da rede geodésica. Há também três subclasses de erro máximo aceitável entre nivelamento e contra nivelamento para cada classe em relação a seções, linhas e circuitos, como mostra o quadro 03. Pela norma NBR13133:1994, há duas classes de nivelamento geométrico ótico para fins topográficos: classes IN e IIN (quadro 04). Já a NBR13133:2021 possui uma classe de nivelamento geométrico: a classe IN (quadro 05).

As normas relativas ao nivelamento geométrico são, neste trabalho, também adaptadas ao nivelamento hidrográfico orbital, uma vez que não há especificações e normas para tais aplicações e sua utilização para fins geodésicos de alta precisão é bastante recente. Na adaptação não estão sendo consideradas algumas características como a instrumentação (sensores orbitais ao invés de níveis óticos) e o tipo de superfície (água ao invés de terra) por exemplo.

Quadro 03 – Controle de qualidade para o nivelamento geométrico geodésico a partir das especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro.

Item	Levantamentos Altimétricos de Alta Precisão		
	Científico		Fundamental
<b>Objetivo</b>	Controle geodésico de Estações maregráficas	Vinculação entre estações maregráficas	Densificação da Rede Altimétrica
<b>Controles para a qualidade</b>			
1.Diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contranivelamento de uma seção (k = comprimento da seção em km)	1,5 mm $\sqrt{k}$	2 mm $\sqrt{k}$	3 mm $\sqrt{k}$



Item	Levantamentos Altimétricos de Alta Precisão		
	Científico		Fundamental
2. Diferença máxima aceitável entre o nivelamento e o contranivelamento de uma linha (k = comprimento da linha em km)	1,5 mm $\sqrt{k}$	3 mm $\sqrt{k}$	4 mm $\sqrt{k}$
3. Valor máximo aceitável para fechamento de circuito	1,5 mm $\sqrt{k}$	3 mm $\sqrt{k}$	5 mm $\sqrt{k}$

Fonte: IBGE, 2017.

Quadro 04 – Especificações para o nivelamento geométrico com fins topográficos segundo a NBR13.133:1994.

Classe	Metodologia	Desenvolvimento			Tolerâncias de fechamento
		Extensão Máxima	Lance Máximo	Lance Mínimo	
IN	Nivelamento geométrico a ser executado com nível classe 3, utilizando miras dobráveis, centimétricas, devidamente aferidas, providas de prumo esférico, leitura a ré e vante dos três fios, visadas equidistantes com diferença máxima de 10 m, ida e volta em horários distintos e com Ponto de Segurança (PS) a cada km, no máximo.	10 km	80 m	15 m	12 mm $\sqrt{k}$
IIN	Nivelamento geométrico a ser executado com nível classe 2, utilizando miras dobráveis centimétricas, devidamente aferidas, providas de prumo esférico, leitura do fio médio, ida e volta ou circuito fechado, com ponto de Segurança (PS) a cada dois km, no máximo.	10 km	80 m	15 m	20 mm $\sqrt{k}$

Fonte: ABNT, 1994.

Quadro 05 – Especificações para o nivelamento geométrico com fins topográficos segundo a NBR13.133:2021.

<b>Classe Método</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Visada máxima recomendada m</b>	<b>Tolerância de fechamento <math>k</math> expresso em km</b>	<b>Finalidade</b>
IN Geométrico	Nível classe 1	80	$6 \text{ mm } \sqrt{k}$	Transporte de altitude ou cota
	Nível classe 2		$8 \text{ mm } \sqrt{k}$	Rede urbana
	Nível classe 3		$12 \text{ mm } \sqrt{k}$	Poligonal principal

Fonte: ABNT, 2021.

### 3 METODOLOGIA

A descrição da metodologia utilizada foi dividida em três subseções. Na primeira subseção é apresentada e caracterizada a área de estudo. Na segunda subseção são descritos os equipamentos, acessórios, materiais e dados utilizados. Na terceira subseção é apresentada a metodologia proposta para a integração de referenciais verticais via nivelamento híbrido terrestre e hidrográfico orbital, com detalhamento de cada etapa que são: conexão terra-terra (nivelamento geométrico); conexão terra-água/água-terra (nivelamento trigonométrico e observações dos linímetros/linígrafos) e conexão água-água (nivelamento hidrográfico orbital). Os procedimentos propostos, descritos a seguir, também permitem a comparação entre um método consagrado, de qualidade comprovada (nivelamento geométrico) com o método experimental, permitindo avaliar a qualidade do nivelamento hidrográfico orbital e sua aplicabilidade na integração de referenciais verticais.

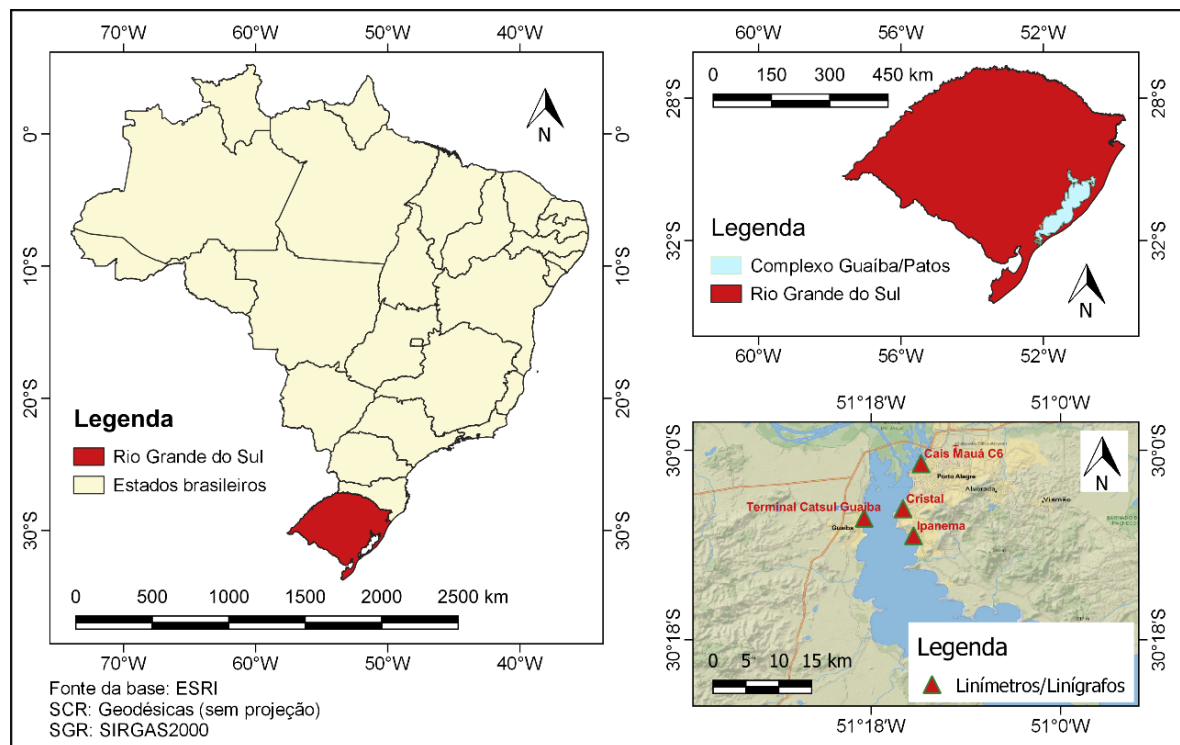
#### 3.1 Área de estudo

A região onde foram realizados os experimentos para a avaliação da metodologia proposta compreende a parte norte do Lago Guaíba, que está localizado no estado do Rio Grande do Sul, entre os municípios de Porto Alegre, Eldorado do Sul, Guaíba e Barra do Ribeiro. A área está situada entre as latitudes  $29^{\circ} 58' 00''\text{S}$  e  $30^{\circ} 11' 00''\text{S}$  e longitudes  $51^{\circ} 20' 00''\text{W}$  e  $51^{\circ} 10' 00''\text{W}$  (Figura 26), referenciadas ao SIRGAS2000. A região foi escolhida pois, além de contar com os dados dos sensores altímetros orbitais, também possui quatro estações linimétricas/linigráficas, duas analógicas materializadas por réguas (Cristal e Ipanema) e duas automáticas telemétricas (Cais Mauá – C6 e Terminal CatSul – Guaíba).

O Lago Guaíba tem área superficial média aproximada de  $496 \text{ km}^2$ , profundidade média em torno de 2 m (12 m no canal de navegação) e máxima de 31 m na Ponta de Itapuã, com variações sazonais devido a influência das chuvas e dinâmica dos ventos (ANDRADE et al., 2019; NICOLODI; TOLDO; FARINA, 2013). A variabilidade do nível da água decorrem das chuvas nas cabeceiras dos rios afluentes junto com o efeito de represamento decorrente do vento sul e a estreita saída para a Lagoa dos Patos e dela para o mar. Períodos de seca, com menor contribuição dos rios e sem o efeito dos ventos, fazem com que o nível abaixe (ANDRADE et al., 2019). O exultório é na Lagoa dos Patos, que tem aproximadamente  $10.000 \text{ km}^2$  (TOLDO JR et al., 2006). O

complexo Guaíba/Patos é ladeado pelos municípios de Arambaré, Camaquã, Capivari do Sul, Barra do Ribeiro, Eldorado do Sul, Guaíba, Mostardas, Palmares do Sul, Pelotas, Porto Alegre, Rio Grande, São José do Norte, São Lourenço do Sul, Tapes, Tavares, Turuçu e Viamão.

Figura 26 – Área de estudo com as estações linimétricas/linigráficas utilizadas na pesquisa.



Fonte: Elaboração própria.

O complexo Guaíba/Patos tem como principais contribuintes de água doce os rios Caí, Jacuí, Gravataí, Sinos e Camaquã, com vazão média de entrada no delta do Jacuí (Guaíba) de 1.493 m<sup>3</sup>/s (ANDRADE NETO et al., 2012). A saída da água do complexo se dá na Barra do Rio Grande junto ao Oceano Atlântico, com vazão média de 4.800 m<sup>3</sup>/s, onde há a influência da maré astronômica da costa oceânica com amplitude de 0,45 m, onde as águas oceânicas podem adentrar até 200 km na Lagoa dos Patos devido a junção de fatores como condições de vento sul, nível baixo da lagoa (média de 6 m) e ocorrência de maré sizígia (TOLDO JR et al., 2006).

Teoricamente, a variação do nível da água não deve impactar negativamente o relacionamento entre as medidas dos sensores altímetros orbitais e as observações dos linímetros/linígrafos, desde que efetuados na mesma época, já que a partir dos dois métodos, está sendo medido o mesmo objeto aproximadamente ao mesmo tempo. Na prática, principalmente quanto às réguas linimétricas que são observadas poucas vezes ao dia, o impacto possa ser significativo, dependendo da estabilidade da superfície da água do corpo hídrico que está sendo medido. Pode haver maior impacto quando se mede o desnível sobre a superfície da água a partir de uma média de várias passagens do satélite altímetro. Porém, na média, as observações em dois pontos diferentes sobre a superfície da água devem ser simultâneas. Desta forma, considera-se que, independentemente do nível da água, o desnível tenha pouca variação. Na verdade, a variação do desnível parece estar mais relacionada aos efeitos do vento do que com a quantidade de água despejada pelos rios.

### **3.2 Materiais utilizados**

Na conexão terra-terra foram utilizados dados da RAAP, já apresentada na seção 2.4.2 (rede altimétrica) e da Rede de Referência Cadastral Municipal de Porto Alegre – RS (RRCM).

As primeiras referências de nível da RAAP, segundo os relatórios do IBGE, foram estabelecidas na região metropolitana de Porto Alegre em 1982, sendo duas referências de nível (RRNN) utilizadas nos experimentos: RN1788Z (SPH – Porto Alegre) e RN2101Z situada na cidade de Guaíba – RS.

A RRCM de Porto Alegre foi implantada em 2010 pelo Consórcio Guaíba, executor do projeto de aerolevante. Foram implantados 94 marcos (50 pilares geodésicos e 44 marcos azimutais) com as altitudes referenciadas à RAAP. Adicionalmente foram materializados mais 1500 novos pontos geodésicos por meio de pinos metálicos, também referenciados à RAAP (PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE, 2013). Da RRCM foram utilizados três pontos, dois como referência (M03 e RN742A) e um auxiliar (P0617) (quadro 06). Lembrando que, como a RRCM tem origem na RAAP (componente altimétrica) e nos experimentos importa apenas os valores relativos (desníveis) e não absolutos (altitudes), no cálculo da propagação das incertezas o desvio padrão da RAAP não é levado em consideração, apenas o desvio padrão da RRCM.

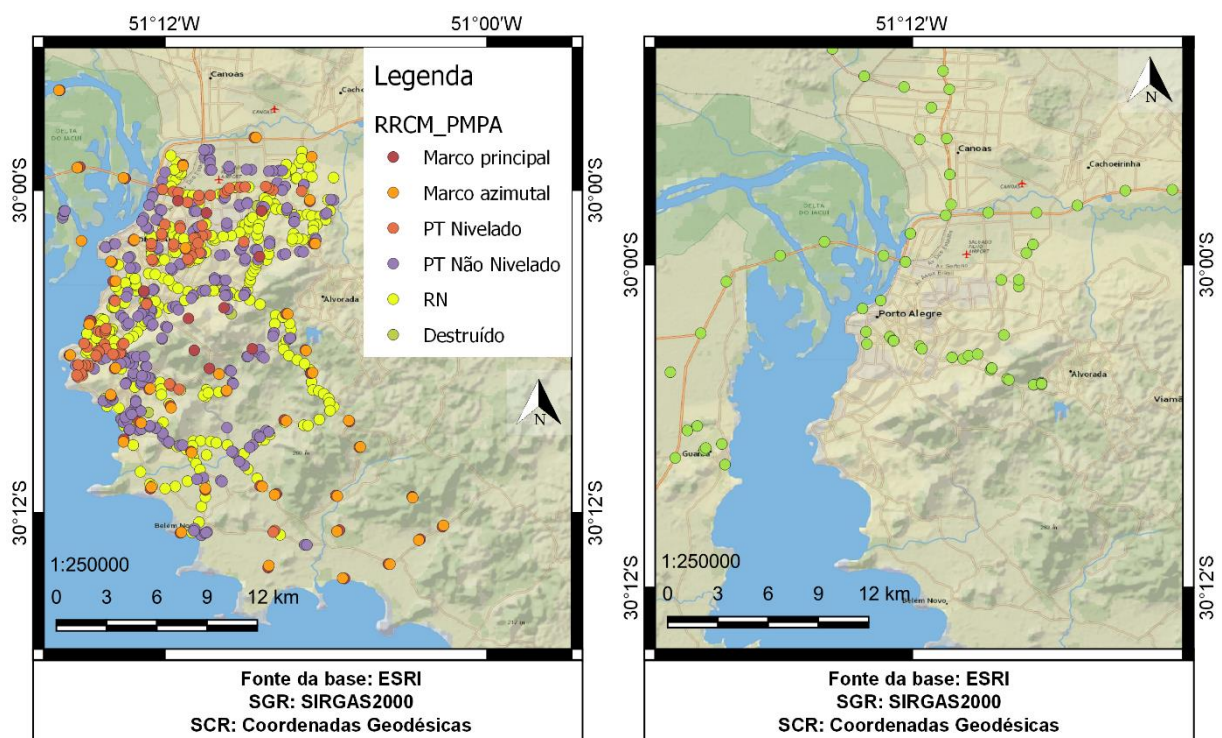
Quadro 06 – Referências de nível utilizadas, onde Rede é a origem (RAAP ou RRCM), H são as altitudes normal-ortométricas e  $\sigma$  é o desvio padrão.

Ponto	Rede	H (m)	$\sigma$ (m)
RN1782Z	RAAP	2,9427	0,06000
RN2101Z	RAAP	43,7348	0,06000
M03	RRCM	6,8490	0,00050
P0617	RRCM	5,4795	0,00595
RN742A	RRCM	2,6753	0,00878

Fonte: IBGE e PMPA.

A figura 27 mostra a localização dos pontos da RRCM (a) e da RAAP (b) na área de estudos.

Figura 27 – Pontos da RRCM (a) e RAAP (b) na área de estudos.



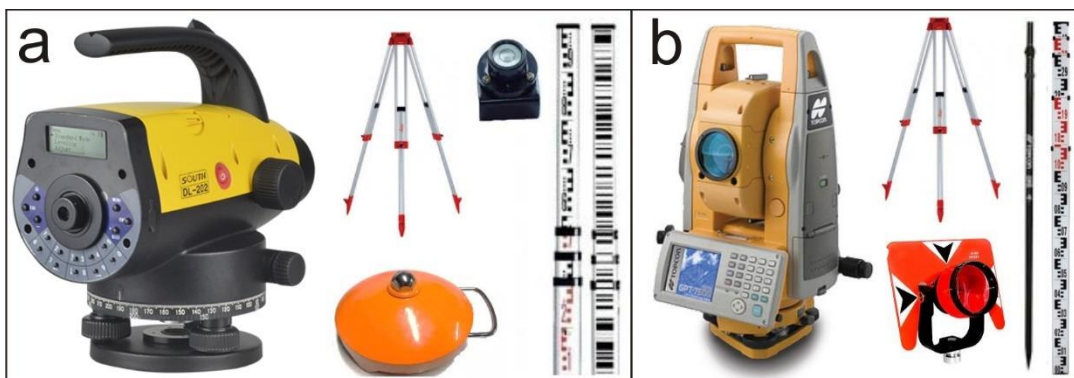
Fonte: Elaboração própria.

No nivelamento geométrico foi utilizado um nível marca South, modelo DL-202, com leitura eletrônica em mira codificada (código de barras), além dos acessórios obrigatórios como tripé de alumínio, miras codificadas, sapatas e nível de bolha para

as miras (figura 28a). O nível DL-202 tem precisão de 1,5 mm/km para leitura digital e 2,0 mm/km para leitura ótica.

Na conexão terra-água/água-terra, para o nivelamento trigonométrico, foi utilizada uma estação total marca Topcon, modelo GPT-7505, com precisão angular de 5" e precisões lineares de  $\pm 10$  mm para leituras sem prisma e  $\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \cdot \text{distância})$  para leituras com prisma, contando como acessórios um tripé de alumínio, bastão, prisma e mira graduada para uso do método de nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância (figura 28b).

Figura 28 – Equipamentos e acessórios utilizados no nivelamento geométrico (a) e nivelamento trigonométrico (b) e seus acessórios.



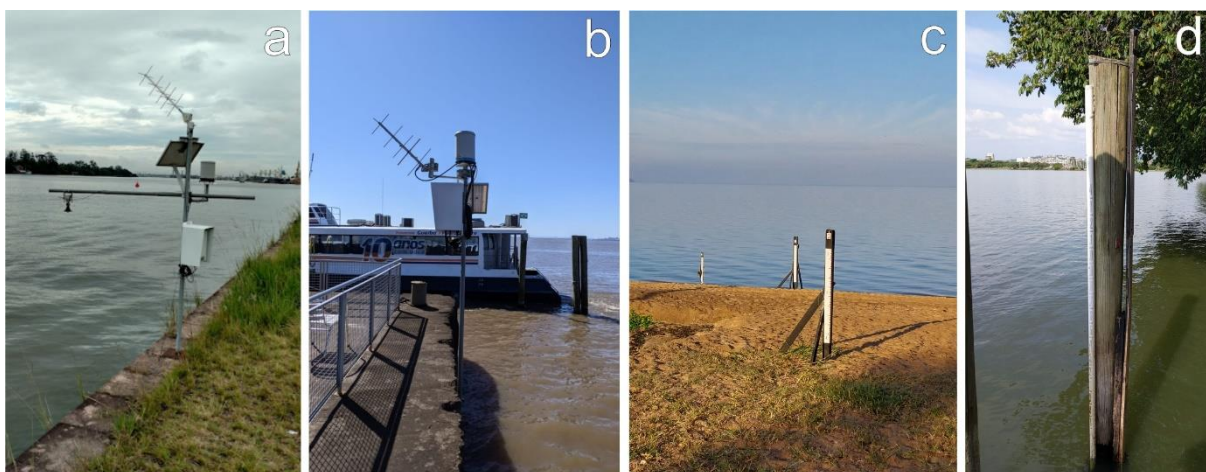
Fonte: Elaboração própria.

Na conexão terra-água/água-terra também foram utilizadas as observações dos linímetros/linígrafos existentes. No SPH foi utilizado o linígrafo 87450004 (Cais Mauá C6) com início das observações em 2014 e 87242000 (Terminal CatSul Guaíba) com as operações iniciadas em 2019, ambos automáticos telemétricos (Radar), que medem o nível da água em intervalos de 15 minutos. Também foram utilizados os linímetros 87460007 (Cristal), situado no clube náutico Veleiros do Sul e com a série histórica iniciada em 1982 e 87460120 (Ipanema) com as observações iniciadas em 1984, situado na praia de Ipanema. Ambos os linímetros são analógicos (régua), cujas leituras são realizadas em dois períodos diariamente: às 7h e às 17h, que podem não ser suficientes se houver uma variação significativa do nível diário da superfície da água ou se o momento da passagem do satélite altímetro for distante (temporalmente) dos momentos das leituras. Os dados das estações automáticas,



operadas pela Secretaria do Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Sul (SEMA-RS), podem ser obtidos no sistema HIDRO-Telemetria da Rede Hidrometeorológica Nacional, sob responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) (<http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria/mapa.aspx>) ou na página da sala de situação da SEMA-RS (<http://www.saladesituacao.rs.gov.br/dados>). As observações das réguas (linímetros analógicos) podem ser obtidas no portal Hidroweb da ANA ([http://www.snirh.gov.br/hidroweb/series\\_historicas](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/series_historicas)). A figura 29 mostra o linígrafo Cais Mauá C6 (figura 29a), o linígrafo Terminal CatSul Guaíba (figura 29b), a régua Ipanema (figura 29c) e a régua Cristal (figura 29d).

Figura 29 – Linímetros/linígrafos utilizados no Cais Mauá C6 (a), em Terminal CatSul Guaíba (b), em Ipanema (c) e em Cristal (d).



Fonte: Elaboração própria.

Para as medidas da superfície da água, com a estação total no modo sem prisma, foi utilizado um dispositivo flutuador, com dimensões de 1 m x 1 m, ancorado na margem do Lago Guaíba, para evitar a penetração do sinal na água, evitando valores irreais das distâncias medidas (realizadas no centro do dispositivo) e, conseqüentemente, valores inconsistentes do nível da água. Este dispositivo é dotado de uma moldura rígida na qual é fixado um tecido impermeável e flexível, devidamente vedado, que se molda à superfície da água. Durante as campanhas de levantamento do nível da água foram analisados os pontos fracos deste dispositivo, sendo aprimorado a medida em que os trabalhos avançavam e as condições da superfície



da água no Lago Guaíba se alteravam (se tornavam mais agitadas). A figura 30 mostra o dispositivo flutuador utilizado e sua pequena evolução.

Figura 30 – Três versões do dispositivo flutuador e na extrema direita uma ilustração da próxima versão, com barreiras externas para minimizar os efeitos da oscilação da superfície da água.



Fonte: Elaboração própria.

Os cálculos dos desníveis entre as referências de nível e dos desníveis entre as RRNN dos linímetros/linígrafos foram realizados a partir de fórmulas montadas em uma planilha eletrônica.

A conexão água-água por meio do nivelamento hidrográfico orbital foi realizada a partir da análise do conjunto de dados mais adequados dentre os disponíveis para os sensores orbitais radar e lidar. As missões radar usadas que interceptam o Lago Guaíba, e o período dos dados utilizados, são: Jason-1 (18/01/2002 a 09/01/2009), Jason-2 (05/07/2008 a 25/09/2016), Jason-3 (20/02/2016 a 31/03/2022), Sentinel-3 (04/03/2016 a 02/10/2022), Jason-CS (Sentinel-6A) (20/12/2020 a 26/10/2022) e Cryosat-2 (01/02/2012 a 25/03/2020).

A série Jason é uma parceria entre CNES, NASA, EUMETSAT (*European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites*) e NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para medir e estudar os processos de circulação oceânica e elevação da superfície do mar, operando os radares altímetros Jason-1/Poseidon-2, Jason-2/Poseidon-3A e Jason-3/Poseidon-3B (CNES et al., 2018).

O Sentinel-3, composto por dois satélites (Sentinel-3A e Sentinel-3B) foi lançado pela agência espacial europeia e é operado pela EUMETSAT, tendo como objetivo medir o oceano, o gelo marítimo, a cobertura de gelo continental, geleiras, rios e lagos (DINARDO, 2020), operando o radar altímetro SRAL. Apenas o satélite Sentinel-3A/SRAL intercepta o Lago Guaíba na sua parte sul.

O Sentinel-6 ou Jason-CS (*Continuity of Service*) possui um satélite já lançado em 2020 e outro planejado para 2025 (DONLON et al., 2021). O Sentinel-6 está equipado com o radar altímetro Poseidon-4 e tem como objetivo melhorar a compreensão do papel do oceano nas mudanças climáticas e de como as atividades humanas impactam na saúde do oceano em escala global (DINARDO et al., 2022).

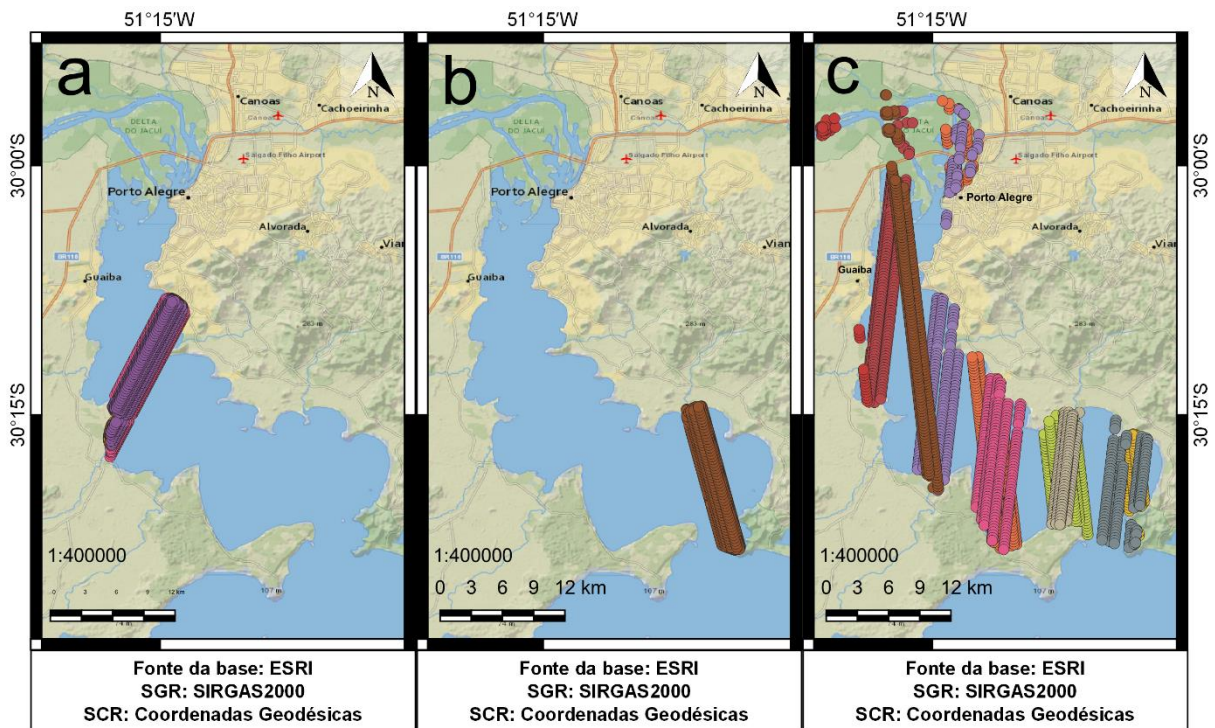
A missão Cryosat-2 foi lançada pela agência espacial europeia para medir a espessura do gelo, capa do gelo continental e o gelo presente em montanhas e geleiras (ESA, 2007), operando o radar altímetro SIRAL. O quadro 07 mostra as missões altimétricas radar usadas e suas características principais (lançamento, sensor altímetro, bandas, modos de operação e resolução temporal – ciclo). A figura 31 mostra a disponibilidade dos dados dos satélites radares altímetros sobre o Lago Guaíba para a série Jason/Sentinel-6 (figura 31a), Sentinel-3 (figura 31b) e Cryosat-2 (figura 31c).

Quadro 07 – Características dos satélites radares altímetros mostrando as missões/sensores, data do lançamento, faixa de frequência (bandas), modo de operação e duração do ciclo (revisita).

<b>Missão</b>	<b>Lançamento</b>	<b>Bandas</b>	<b>Modo de operação</b>	<b>Ciclo</b>
Jason-1/Poseidon-2	07/12/2001	Ku, C	LRM	10 dias
Jason-2/Poseidon-3A	20/06/2008	Ku, C	LRM	10 dias
Jason-3/Poseidon-3B	17/01/2016	Ku, C	LRM	10 dias
Sentinel-3/SRAL	16/02/2016	Ku, C	SAR, LRM	27 dias
Sentinel-6/Poseidon-4	21/11/2020	Ku, C	SAR, LRM	10 dias
Cryosat-2/SIRAL	08/04/2010	Ku	SAR, SARIn, LRM	369 dias (subciclos de 30 dias)

Fonte: DINARDO, 2020; DINARDO et al., 2022; WINGHAM et al., 2004.

Figura 31 – Satélites radares altímetros da série Jason e Sentinel-6 (a), Sentinel-3 (b) e Cryosat-2 (c) que interceptam o Lago Guaíba.



Fonte: Elaboração própria.

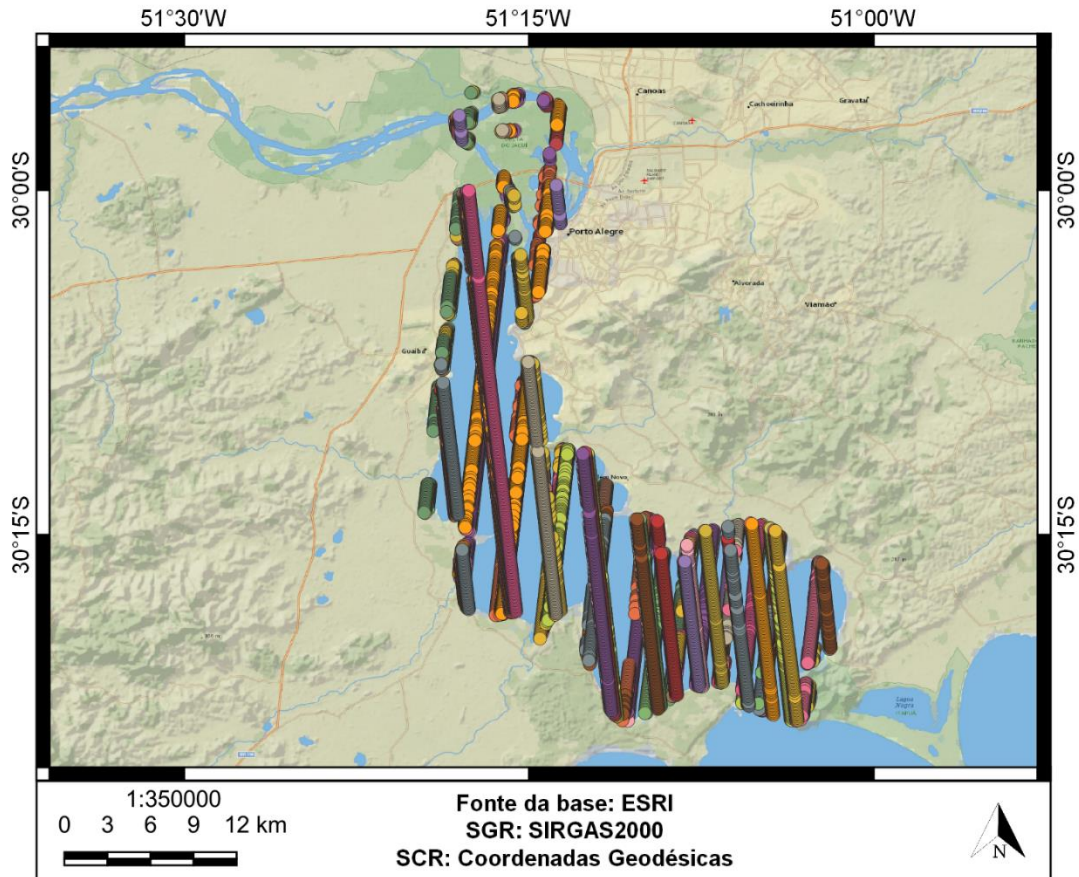
Os dados geofísicos são normalmente disponibilizados em três modos: *Delayed Time* (GDR), *Near-Real Time* (IGDR) e *Real Time* (OGDR). Para a missão Sentinel-3 as denominações são *Non-Time Critical* (NTC), *Slow-Time Critical* (STC) e *Near Real-Time* (NRT). Os modos se referem à relação entre o tempo de disponibilização e a qualidade, principalmente quanto à determinação da órbita dos satélites. GDR ou NTC são dados disponibilizados após um mês ou mais da aquisição (maior qualidade), IGDR ou STC são disponibilizados em alguns dias e OGDR ou NRT depois de algumas horas após a aquisição (órbitas e, conseqüentemente, qualidade posicional menor) (AVISO+, 2022; COPERNICUS; EUMETSAT, 2022). Os dados são disponibilizados em pelo menos cinco níveis de processamento: L1, L2, L2P, L3 e L4 (COPERNICUS; EUMETSAT, 2017). Há também, pelo menos, duas frequências de dados que podem ser adquiridas: 1 Hz, com espaçamento entre pontos da trilha de 6 km a 7 km dependendo da latitude (SHU et al., 2021) e 20 Hz, com espaçamento entre pontos de aproximadamente 350 m ao longo da trilha (REALE et al., 2020). Nas análises, optou-se pelo nível de processamento L2P (1 Hz) e L2 (20 Hz) por serem

versões de dados com maior nível de processamento e qualidade, mas que não passaram por filtros, a partir do modo NTC (GDR), sendo que o nível de processamento L2P ainda traz os valores do MSS e SLA com todas as correções implementadas, o que facilita o cálculo do SSH. Tanto os dados de 1 Hz quanto os dados de 20 Hz foram analisados para verificar qual teria melhor aplicabilidade na área de estudos. Os dados foram produzidos e distribuídos por CTOH (*Centre de Topographie des Océans et l'Hydrosphère*)/LEGOS (*Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales*), França, a partir do repositório (<ftp-access.aviso.altimetry.fr>) para frequência de dados de 1Hz e ([http://ctoh.legos.obs-mip.fr/applications/land\\_surfaces/altimetric\\_data/altis](http://ctoh.legos.obs-mip.fr/applications/land_surfaces/altimetric_data/altis)) para frequência de dados de 20 Hz.

A missão Lidar ICESat-2 (*Ice, Cloud and Elevation Satellite-2*), lançada em 15 de setembro de 2018, tem por objetivo medir a elevação dos mantos de gelo, geleiras, gelo marinho, vegetação, nuvens, águas continentais dentre outras aplicações (NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER, 2023). Opera o altímetro laser ATLAS (*Advanced Topographic Laser Altimeter System*) que mede a distância satélite-superfície a partir de um pulso laser com frequência de 10 kHz. Filtros são utilizados para classificar os alvos na qual os fótons são refletidos. Quanto à superfície da água, são classificados os fótons refletidos pela superfície, pelas diversas profundidades até o fundo do corpo hídrico e os fótons que não são provenientes do sensor (ruídos de fundo). Desta forma é possível descartar, nas medidas sobre a superfície da água, dados inerentes à penetração do sinal. O sensor possui três pares de feixes laser, com cada par separado por aproximadamente 3 km e cada lado do par por 90 m (projetados na superfície). Os pares são identificados pelo prefixo GT (*Ground Track*) e pelo seu número (1, 2 e 3) e os lados como R (*right* – direita) e L (*left* – esquerda), portanto, para cada conjunto há as trilhas GT1L, GT1R, GT2L, GT2R, GT3L e GT3R. Cada par possui um feixe de alta energia (forte, de aproximadamente 100 mj) e um feixe de baixa energia (fraco, de aproximadamente 25 mj). A pegada (*footprint*) sobre a superfície é de aproximadamente 17 m e a resolução espacial (distância entre os pontos ao longo da trilha) é variável, sendo de aproximadamente 100 m sobre a superfície do Lago Guaíba. Três conjunto de trilhas (faixas) interceptam a área de estudo: 551, 757, 993 e 1199 (figura 32).



Figura 32 – Conjunto de trilhas provenientes das passagens ICESat-2 que interceptam o Lago Guaíba, onde as diferentes cores representam as diversas passagens sobre o corpo hídrico.



Fonte: Elaboração própria.

Os produtos de dados gerados usam o prefixo ATL e um número sequencial, destinados à diversas aplicações em diversos níveis de processamento. Os produtos partem do ATL00 (dados de telemetria) até o ATL21 (grade da altura mensal da superfície do mar sob cobertura de gelo marinho) (MARKUS et al., 2017). Nos experimentos foram usados os produtos ATL08 e ATL13 devido a afinidade com a superfície das águas continentais.

O ATL08 (altura da vegetação e das águas interiores) permite a determinação da altura da superfície emersa da Terra, incluindo a vegetação e a superfície da água. Os dados permitem incluir a altura do dossel da vegetação, sua porcentagem de cobertura, inclinação e rugosidade (MARKUS et al., 2017).

O ATL13 (altura das águas interiores) destina-se a distribuição da altura da superfície das águas interiores e perto da costa oceânica. Com os dados também é possível determinar a rugosidade, inclinação e aspecto da água (MARKUS et al., 2017). Os dados ICESat-2 foram adquiridos junto ao *openaltimetry advanced discovery, processing, and visualization services for icesat and icesat-2 altimeter data* (<https://openaltimetry.org/data/icesat2/>).

As alturas do nível da água medidas pelos altímetros orbitais são georreferenciadas ao elipsoide WGS84, que em sua última realização está alinhado ao ITRF e, conseqüentemente, ao elipsoide GRS80 (referência do SIRGAS), com concordância até o nível do centímetro. Desta forma, considerou-se SIRGAS2000 e WGS84 coincidentes, principalmente no que concerne aos métodos de cálculo adotados, explorando valores relativos (desníveis) em detrimento aos valores absolutos (altitudes). Esta condição também vale quanto a adoção da altitude normal-ortométrica sobre a terra (disponível para a RAAP quanto ao reajustamento realizado em 2011) e altitude ortométrica transformada a partir da altitude elipsoidal e modelo geoidal, explorando os valores relativos e não absolutos. A conversão entre as altitudes elipsoidais provenientes dos sensores altímetros em altitudes ortométricas foram realizadas a partir do MapGeo2015, sendo feitas devido a necessidade de uma altitude que tenha relação com os efeitos conjugados da gravidade terrestre e força centrífuga e que também explique o fluxo da água.

O MapGeo2015 é um modelo geoidal desenvolvido a partir de uma parceria do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) (BLITZKOW et al., 2016). Está referenciado ao elipsoide GRS80 (SIRGAS2000), confinado entre as latitudes de 6°N e 35°S e longitudes 75°W e 30°W (BLITZKOW et al., 2016).

No desenvolvimento do modelo foram utilizadas 947953 estações gravimétricas terrestres (IBGE, 2015), ratificados pelo programa DIVA desenvolvido no *Bureau Gravimétrique International* (BGI) (JEAN-PIERRE; MICHEL, 2002). Foi também empregado um modelo digital de elevação baseado no *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e o modelo global do geopotencial EIGEN-6C4 até o grau e ordem 200 (BLITZKOW et al., 2016).

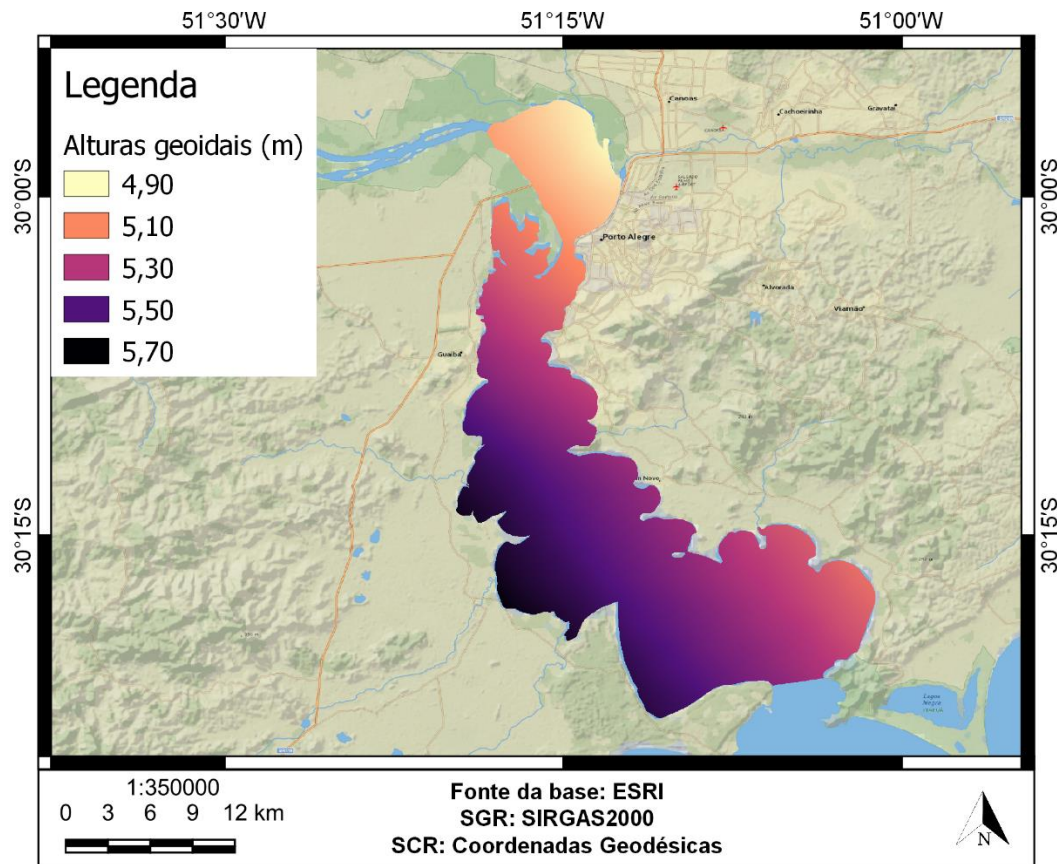
Cinco etapas principais são usadas na geração do modelo geoidal (BLITZKOW et al., 2016; ELLMANN; VANÍČEK, 2007; JANÁK et al., 2017): Cálculo das anomalias

ar-livre pontuais; Cálculo das anomalias completas de Bouguer pontuais; Cálculo das anomalias da gravidade de Helmert; Integração de Stokes; Adição do efeito indireto topográfico primário nas ondulações geoidais referidas a um co-geoide.

Curtos comprimentos de onda foram estimados pela transformada rápida de Fourier (FFT) usando a modificação do núcleo de Stokes proposta por Featherstone (2003). Médios e longos comprimentos de onda foram removidos e repostos com a técnica remove-calcula-restaura (SCHWARZ; SIDERIS; FORSBERG, 1990; SIDERIS; SHE, 1995). Uma grade de 5' das anomalias ar-livre médias foi completada na região oceânica (BLITZKOW et al., 2016) com as anomalias derivadas do modelo altimétrico por satélite DTU10 (ANDERSEN, 2010). Regiões com vazios de informações gravimétricas foram densificadas utilizando a metodologia de Redes Neurais Artificiais (RNA) (BLITZKOW et al., 2016; IBGE, 2015).

Os valores de altitude normais-ortométricas de 592 referências de nível pertencentes à Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) foram utilizados para avaliar a consistência do modelo (BLITZKOW et al., 2016). O erro quadrático médio foi de  $\pm 17$  cm (BLITZKOW et al., 2016; IBGE, 2015). Na área de estudos, a média das discrepâncias entre as altitudes elipsoidais transformadas em altitudes ortométricas a partir da altura geoidal e as altitudes normais-ortométricas das referências de nível é de 18 cm, com desvio padrão de 12 cm (FALAVIGNA et al., 2018). Os resultados alcançados por Falavigna et al. (2018) é compatível com as análises apontadas por Blitzkow et al. (2016) geradas pelo IBGE (2015), onde as discrepâncias para a região sul do Brasil ficaram com média de 0,11 m, valor máximo de 0,33 m e valor mínimo de -0,41 m. No Lago Guaíba as discrepâncias estão na faixa entre 0,1 m e 0,2 m (BLITZKOW et al., 2016). A figura 33 mostra a altura geoidal no Lago Guaíba.

Figura 33 – Alturas geoidais do MapGeo2015 no lago Guaíba.



Fonte: Elaboração própria.

Parte das discrepâncias encontradas nos valores absolutos de altitude pode estar relacionada a incompatibilidade (ao nível centimétrico) entre as altitudes normais-ortométricas niveladas e as altitudes ortométricas transformadas a partir das altitudes elipsoidais e alturas geoidais do MapGeo2015, levando em consideração todos os erros associados na determinação dos parâmetros segundo cada método. Supondo que as discrepâncias se mantenham aproximadamente constantes, os impactos nos valores relativos (desníveis) tendem a ser significativamente menor (ao nível milimétrico).

### 3.3 Nivelamento híbrido terrestre e hidrográfico orbital

Para a integração entre referenciais verticais terrestres usando a superfície da água são usadas três abordagens denominadas, como já citadas anteriormente na subseção 3.2 (Materiais utilizados): terra-terra, terra-água/água-terra e água-água.



A abordagem terra-terra (citada na subseção 3.2) usa o método terrestre do nivelamento geométrico para obter a diferença de nível entre dois pontos sobre a terra, geralmente entre o referencial vertical a ser integrado e a referência de nível no ponto de conexão entre a terra e a água (linímetros/linígrafos).

A abordagem terra-água/água-terra (citada na subseção 3.2) usa o nivelamento trigonométrico para conectar a referência de nível do linímetro/linígrafo à superfície da água. O nivelamento trigonométrico é usado em detrimento ao nivelamento geométrico (mais preciso) devido a possibilidade da medida direta da superfície da água a partir do distanciômetro da estação total (modo sem prisma), sem a necessidade de haver contato físico com o linímetro/linígrafo, o que pode desestabilizá-lo. Outra vantagem é a possibilidade de efetuar medidas com intervalo de tempo curto (menor que 1 segundo), o que permite maior número de observações em um curto período (algumas horas), ideal para investigações de fenômenos de baixa frequência que influenciam as variações do nível da superfície da água.

Na abordagem água-água (citada na subseção 3.2) é empregado o nivelamento hidrográfico para a obtenção do desnível entre dois pontos sobre a superfície da água. O desnível é determinado a partir de dados obtidos de sensores altímetros orbitais, a partir das trilhas projetadas sobre a superfície do corpo hídrico ou de um modelo da topografia dinâmica média (MDT). Nesta abordagem há a necessidade de avaliar se os dados altimétricos orbitais cobrem toda a área de interesse (inclusive as margens do corpo hídrico) ou há a necessidade de cobrir as lacunas, caso existam, com outros tipos de conjunto de dados, como modelos hidrodinâmicos por exemplo.

Os métodos terrestres de nivelamento, geométrico e trigonométrico, que caracterizam respectivamente os caminhos terra-terra e terra-água/água-terra, consistem em determinar o desnível entre uma referência de nível sobre a terra e a superfície da água para uma determinada época. Neste nivelamento híbrido parcial, por meio do nivelamento geométrico é determinado o desnível entre a RN de referência (a ser integrada) e a RN do linímetro/linígrafo. Com o nivelamento trigonométrico, usando uma estação total, é obtido o desnível entre a RN do linímetro/linígrafo e a superfície da água para a época da medida, já que o nível da superfície da água é variável, com os desníveis variando ao longo do tempo. O desnível obtido é então relacionado à observação do nível da água no linímetro/linígrafo para a obtenção do “zero da régua”, permitindo efetuar a conexão

terra-água/água-terra em qualquer época, desde que haja observações válidas no linímetro/linígrafo. A figura 34 ilustra a simulação de um nivelamento híbrido parcial usando métodos terrestres.

Figura 34 – Simulação de uso de métodos terrestres de nivelamento para a integração de referenciais altimétricos (nivelamento híbrido parcial).



Fonte: Elaboração própria.

Supondo as estações  $k$ ,  $l$  e  $l'$  (centro ótico da estação total) sobre a terra, e a estação  $i$  sobre a superfície da água em uma determinada época  $t$ , o desnível calculado a partir do nivelamento híbrido parcial ( $\Delta H_{ki}^{HI(t)}$ ) é calculado a partir da equação 64, onde  $\Delta H_{kl}^{RN}$  é o desnível entre a RN a ser integrada e a RN do linímetro/linígrafo (equação 65) e  $\Delta H_{li}^{RN'(t)}$  é o desnível entre a RN do linímetro/linígrafo e a superfície da água na época  $t$  (equação 66).

$$\Delta H_{ki}^{HI(t)} = \Delta H_{kl}^{RN} + \Delta H_{li}^{RN'(t)} \quad (64)$$

$$\Delta H_{ki}^{RN} = \frac{\sum_{t=1}^k g_t \cdot \delta n_{t, t+1}}{\sum_{t=1}^k g_t} \quad (65)$$

$$\Delta H_{ii}^{RN'(t)} = \text{Cos}Z_i \cdot \Delta D_{ii}^i - \text{Cos}Z_i \cdot \Delta D_{ii}^i - \delta H_i \quad (66)$$

Onde:  $\delta n$  é o desnível parcial do nivelamento geométrico;  $g$  é a gravidade;  $Z$  é a distância zenital (ângulo vertical);  $\Delta D$  é a distância inclinada; e  $\delta H$  é a altura do prisma.

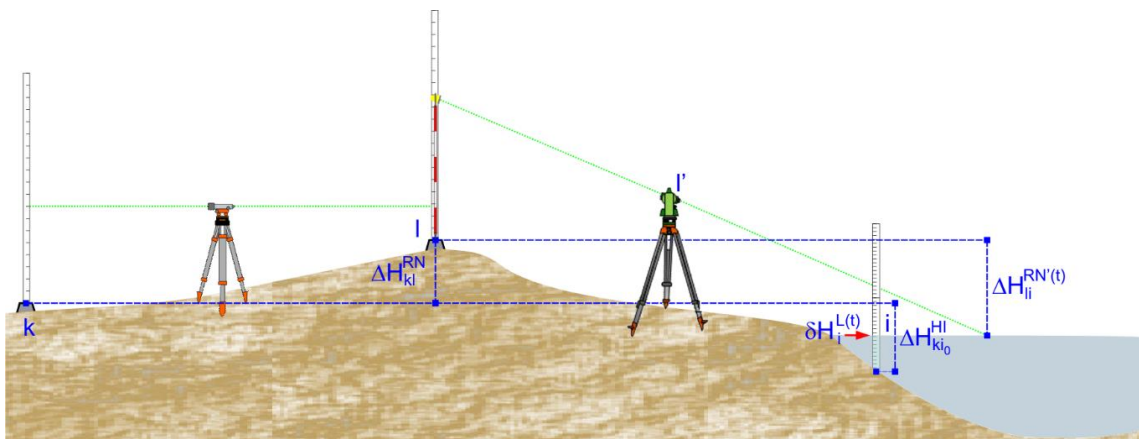
A relação entre  $\Delta H_{ki}^{HI(t)}$  e a observação do linímetro/linígrafo em uma mesma época  $t$  ( $\delta H_i^{L(t)}$ ) resulta no desnível entre a RN a ser integrada e o ponto de referência do linímetro/linígrafo ou “zero da régua” ( $\Delta H_{ki0}^{HI}$ ), dado pela equação 67. Desta forma, apenas invertendo o sinal da equação 67 (equação 68), é possível determinar o desnível entre a RN a ser integrada e a superfície da água em qualquer época a partir das observações dos linímetros/linígrafos, podendo ser compatibilizada as observações linigráficas/linimétricas para a época de passagem dos satélites.

$$\Delta H_{ki0}^{HI} = \Delta H_{ki}^{HI(t)} - \delta H_i^{L(t)} \quad (67)$$

$$\Delta H_{ki}^{HI(t)} = \Delta H_{ki0}^{HI} + \delta H_i^{L(t)} \quad (68)$$

Na figura 35 é apresentado o perfil geral do nivelamento híbrido parcial, abordando os métodos terrestres para conexão terra-terra e terra-água/água-terra.

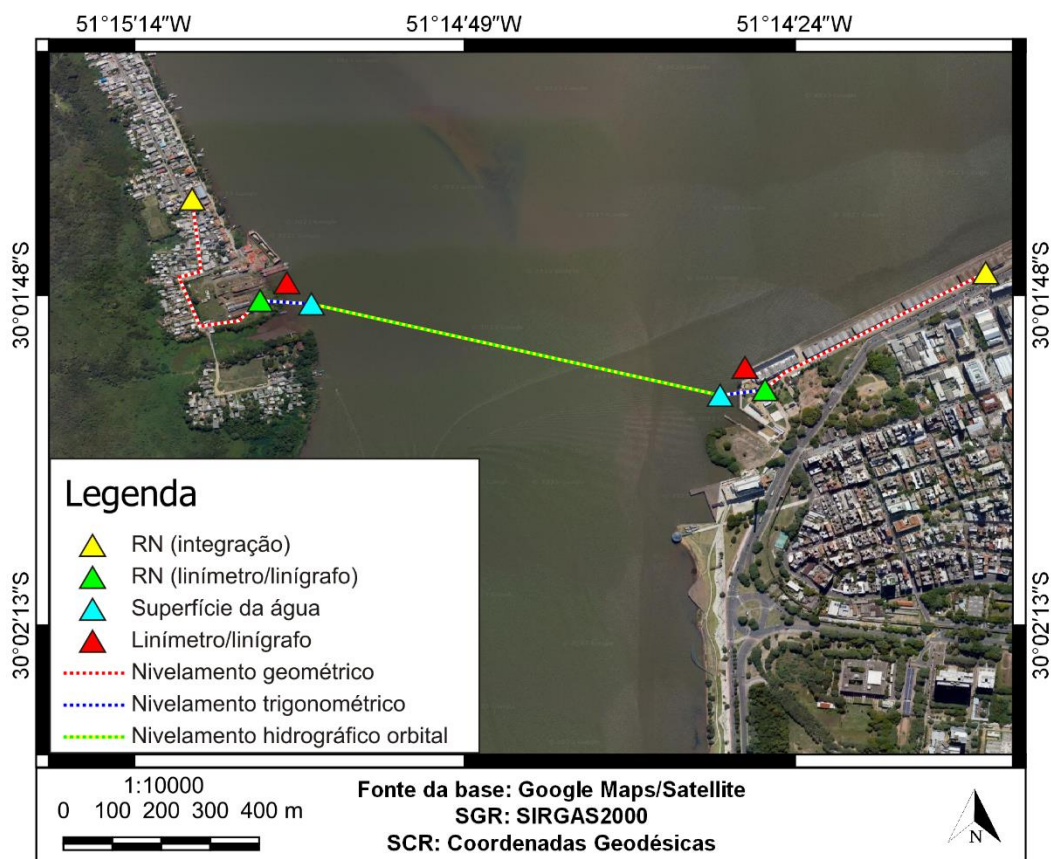
Figura 35 – Perfil do nivelamento híbrido parcial usando métodos terrestres de nivelamento conjugando o nivelamento geométrico entre o referencial altimétrico e a referência de nível do linímetro/linígrafo, e o nivelamento trigonométrico entre a referência de nível do linímetro/linígrafo e a superfície da água.



Fonte: Elaboração própria.

Na abordagem completa denominada terra-água-terra (nivelamento híbrido completo), parte-se de uma referência de nível a ser integrada até a referência de nível de um linímetro/linígrafo por nivelamento geométrico, efetuando a conexão terra-água empregando o nivelamento trigonométrico e relacionando o desnível determinado à observação do linímetro/linígrafo. Esta etapa, terrestre, já foi apresentada como nivelamento híbrido parcial. Deste linímetro/linígrafo segue até outro linímetro/linígrafo por meio do nivelamento hidrográfico orbital usando as trilhas dos sensores altímetros orbitais, que é o método hidrográfico de nivelamento ou abordagem água-água. Deste outro linímetro/linígrafo segue usando o nivelamento híbrido parcial, invertendo-se a conexão terra-água para a abordagem água-terra, até a referência de nível de chegada, como demonstra a figura 36, onde supõe-se que não haja lacunas a cobrir próximo às margens do corpo hídrico.

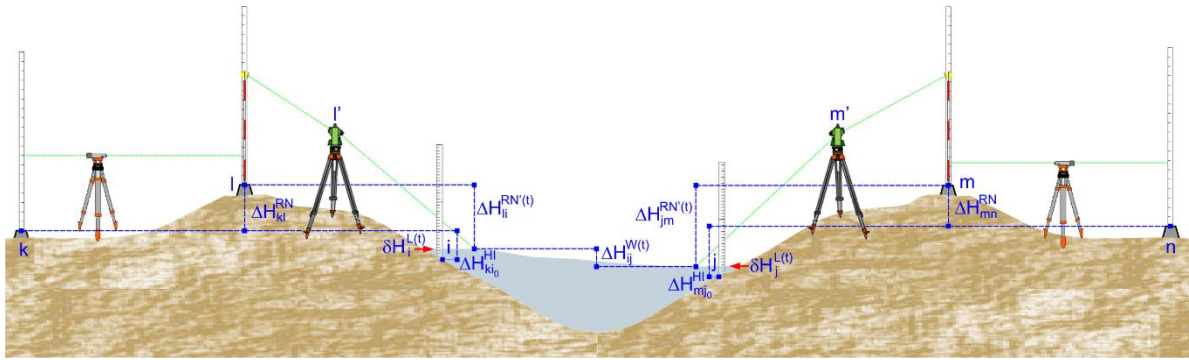
Figura 36 – Simulação de uso de métodos terrestres e hidrográfico de nivelamento para a integração de referenciais altimétricos (nivelamento híbrido completo).



Fonte: Elaboração própria.

Seguindo o perfil geral do nivelamento híbrido completo (figura 37), considerando quatro pontos em terra (k, l, m e n) e dois na água (i e j) junto a linímetros/linígrafos, as diferenças de nível entre a RN k e o ponto i sobre a superfície da água em uma época t ( $\Delta H_{ki}^{RN(t)}$ ) e entre ponto j sobre a superfície da água e a RN n ( $\Delta H_{jn}^{RN(t)}$ ) são calculadas a partir das equações 69 e 70.

Figura 37 – Perfil do nivelamento híbrido completo usando métodos terrestres de nivelamento conjugando o nivelamento geométrico entre os referenciais altimétricos e as referências de nível dos linímetros/linígrafos, o nivelamento trigonométrico entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos e a superfície da água e o nivelamento hidrográfico orbital entre os linímetros/linígrafos.



Fonte: Elaboração própria.

$$\Delta H_{ki}^{RN(t)} = \Delta H_{ki}^{HI(t)} = \frac{\sum_{t=l}^k g_t \cdot \delta n_{t, t+1}}{\sum_{t=l}^k g_t} + (\cos Z_i \cdot \Delta D_{l'i}^j - \cos Z_l \cdot \Delta D_{l'i}^j - \delta H_l) \quad (69)$$

$$\Delta H_{jn}^{RN(t)} = \Delta H_{jn}^{HI(t)} = (\cos Z_m \cdot \Delta D_{m'm}^j - \delta H_m - \cos Z_j \cdot \Delta D_{m'j}^j) + \frac{\sum_{t=n}^m g_t \cdot \delta n_{t, t+1}}{\sum_{t=n}^m g_t} \quad (70)$$

Se conhecido o desnível até o “zero da régua”,  $\Delta H_{ki}^{HI(t)}$  é calculado empregando a equação 68 e  $\Delta H_{jn}^{HI(t)}$  usando a equação 71 a seguir.

$$\Delta H_{jn}^{HI(t)} = \Delta H_{mj_0}^{HI} + \delta H_j^{L(t)} \quad (71)$$

O desnível, para o nivelamento hidrográfico orbital (sobre a superfície da água), é dado pela equação 72, para uma época t.

$$\Delta H_{ij}^{W(t)} = H_j^{W(t)} - H_i^{W(t)} \quad (72)$$

A equação 73 apresenta a fórmula geral para o desnível entre as duas RRNN de integração pelo método híbrido completo conjugando o nivelamento geométrico, o nivelamento trigonométrico e o nivelamento hidrográfico orbital. Com a equação 74 é calculada a diferença de nível entre as duas RRNN de integração conectadas por nivelamento geométrico (terrestre) e a equação 75 mostra o cálculo da discrepância entre os métodos terrestre (nivelamento geométrico) e híbrido completo para a avaliação de resultados.

$$\Delta H_{kn}^{HIB} = \Delta H_{ki}^{RN(t)} + \Delta H_{ij}^{W(t)} + \Delta H_{jn}^{RN(t)} \quad (73)$$

$$\Delta H_{kn}^{RN} = H_n^{RN} - H_k^{RN} \quad (74)$$

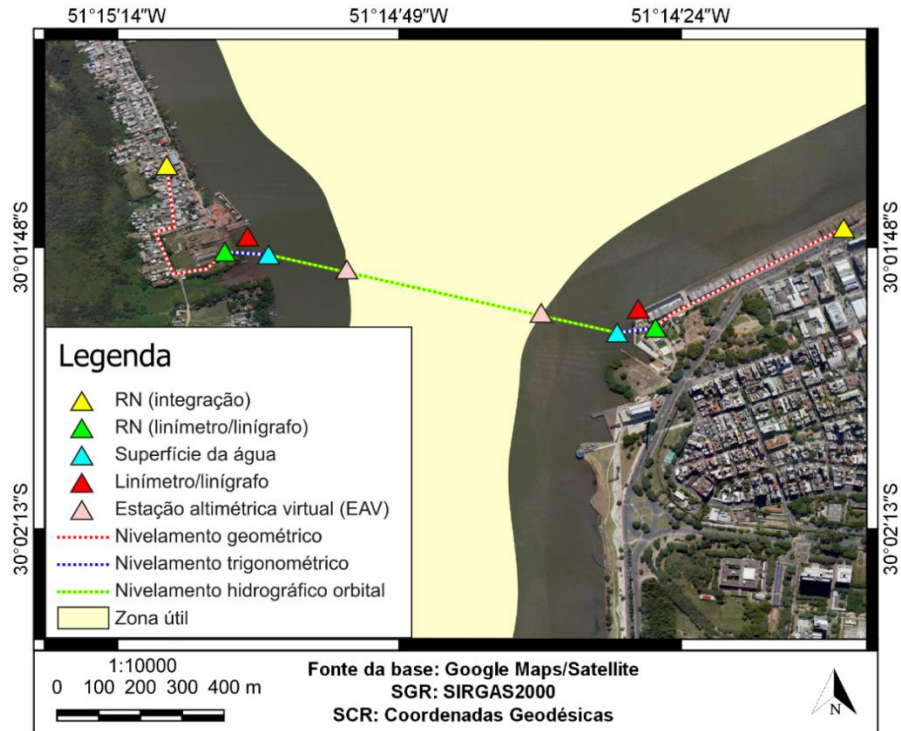
$$\nabla \Delta H_{kn} = \Delta H_{kn}^{RN} - \Delta H_{kn}^{HIB} \quad (75)$$

Caso os dados dos sensores altímetros não cubram as regiões próximas as margens do corpo hídrico, como é o caso dos sensores radar, deve-se resolver esta lacuna. Nesse caso, são estabelecidas duas estações altimétricas virtuais (EAV) no limite da zona coberta por dados válidos (zona útil), como mostra a simulação na figura 38.

Assim, adaptando o caso anterior para uma situação onde há lacunas próximas as margens, os pontos i e j passam a caracterizar as EAV sobre a superfície da água no limite entre a zona útil e a lacuna e os pontos i' e j' a superfície da água próxima aos linímetros/linígrafos, sobre a lacuna (figura 39). Esta região sem dados válidos pode ser coberta por modelos hidrodinâmicos ou medições *in situ* como boias GNSS e sensores laser ou radar aerotransportados por exemplo.

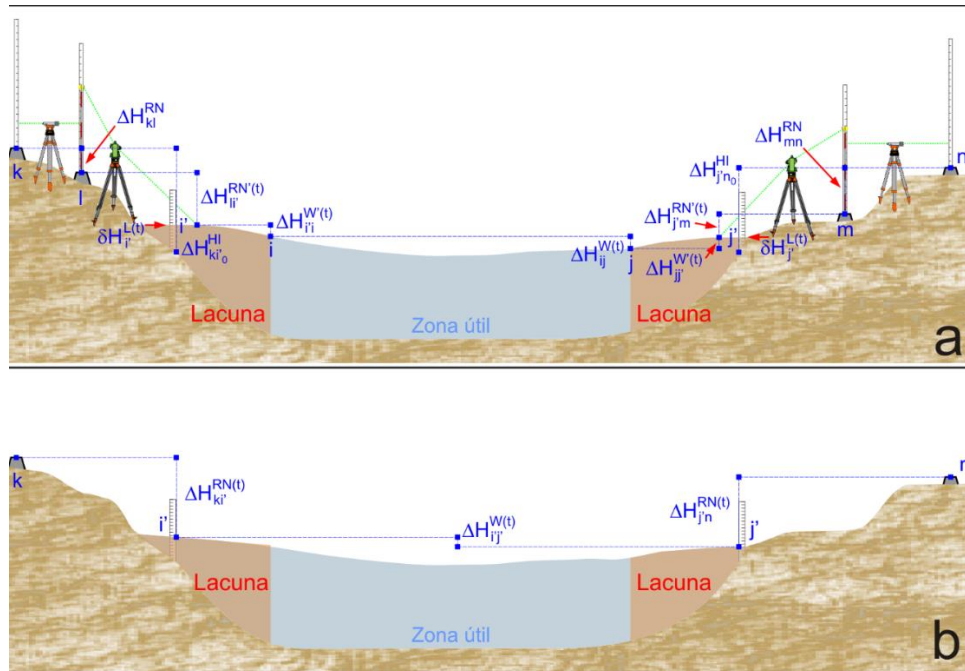


Figura 38 – Simulação de uso do nivelamento híbrido completo com lacuna próxima as margens, onde é necessária a criação de estações altimétricas virtuais (EAV).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Perfil do nivelamento híbrido completo com lacuna próxima as margens (a) e desníveis totais (b).



Fonte: Elaboração própria.

O desnível híbrido completo nesta configuração é calculado a partir da equação 76 em termos de conexão terra-água ( $\Delta H_{ki'}^{RN(t)}$ ), água-água ( $\Delta H_{ij'}^{W(t)}$ ) e água-terra ( $\Delta H_{jn}^{RN(t)}$ ), que é diferente do nivelamento híbrido parcial ( $\Delta H_{ki}^{HI(t)}$ ) (equação 64).

$$\Delta H_{kn}^{HIB} = \Delta H_{ki'}^{RN(t)} + \Delta H_{ij'}^{W(t)} + \Delta H_{jn}^{RN(t)} \quad (76)$$

Onde:

$$\Delta H_{ki'}^{RN(t)} = \Delta H_{ki}^{RN} + \Delta H_{ij'}^{RN(t)} \quad (77)$$

$$\Delta H_{ij'}^{W(t)} = \Delta H_{ii}^{W(t)} + \Delta H_{ij}^{W(t)} + \Delta H_{jj'}^{W(t)} \quad (78)$$

$$\Delta H_{jn}^{RN(t)} = \Delta H_{jm}^{RN(t)} + \Delta H_{mn}^{RN} \quad (79)$$

Nas equações 77 e 78,  $\Delta H_{ki'}^{RN(t)}$  é o desnível entre a primeira referência de nível a ser integrada e a superfície da água e  $\Delta H_{jn}^{RN(t)}$  é o desnível entre a superfície da água e a segunda referência de nível a ser integrada, cujos cálculos pormenorizados são realizados por meio das equações 69 e 70 respectivamente, já apresentadas (considerando i como i' e j como j' na região sem dados válidos disponíveis), assim como a determinação do desnível pelo nivelamento híbrido parcial (equações 68 e 71). Na equação 78, no cálculo do desnível total sobre a superfície da água ( $\Delta H_{ij'}^{W(t)}$ ),  $\Delta H_{ij}^{W(t)}$  na zona útil é calculado a partir da equação 72 já apresentada, e  $\Delta H_{ii}^{W(t)}$  e  $\Delta H_{jj'}^{W(t)}$  são calculados empregando as equações 80 e 81.

$$\Delta H_{ii}^{W(t)} = H_i^{W(t)} - H_{i'}^{W(t)} \quad (80)$$

$$\Delta H_{jj'}^{W(t)} = H_{j'}^{W(t)} - H_j^{W(t)} \quad (81)$$

Onde  $H_{i'}^{W(t)}$  e  $H_{j'}^{W(t)}$  são os valores de altitudes ortométricas a serem determinados por outros métodos que preencham a lacuna deixada.

### 3.3.1 Conexão terra-terra via nivelamento geométrico

A conexão terrestre entre as referências de nível das estações linimétricas/linigráficas foi estabelecida a partir do nivelamento geométrico com o intuito de comparar os resultados com os valores obtidos a partir do nivelamento hidrográfico orbital, para avaliar a qualidade e a possibilidade de aplicação deste para



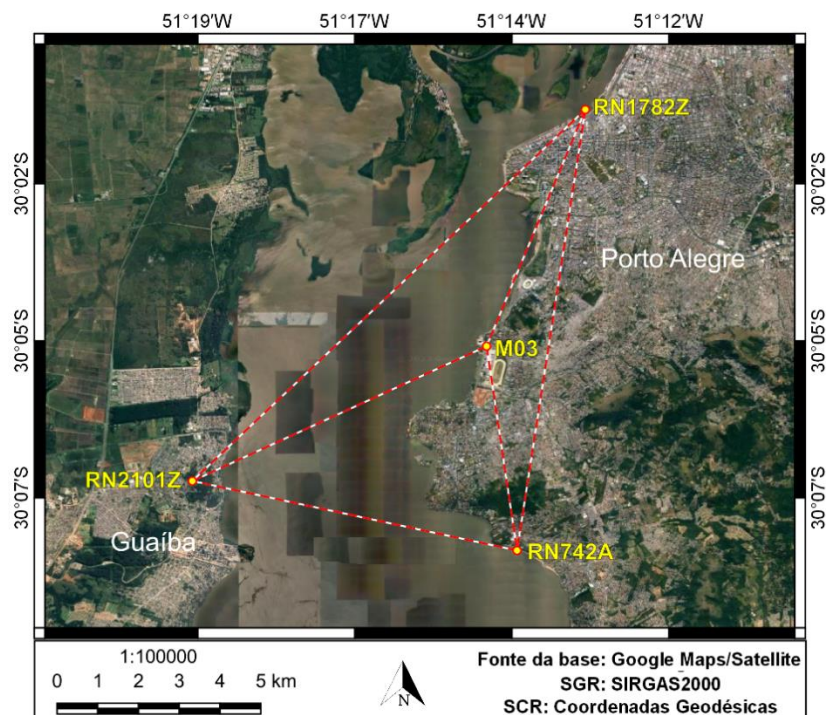
fins de integração entre referenciais verticais, além de fazer parte da metodologia do nivelamento híbrido inerente a integração de referenciais verticais.

Os cálculos dos desníveis foram efetuados em duas etapas. Na primeira etapa foram calculadas as diferenças de nível entre as RN pertencentes a RAAP e a RRCM mais próximas às estações linimétricas/linigráficas a partir das altitudes normais-ortométricas ( $\Delta H_{i,i+1}$ ) usando a equação 82, onde  $H_i$  é a altitude normal-ortométrica da RN e  $H_{i+1}$  é a altitude normal-ortométrica da RN posterior.

$$\Delta H_{i,i+1} = H_{i+1} - H_i \quad (82)$$

Os desníveis da primeira etapa foram calculados entre as RRNN 1782Z (RAAP) na Superintendência de Portos e Hidrovias (SPH), M03 (RRCM) em Cristal, RN742A (RRCM) em Ipanema e 2101Z (RAAP) na cidade de Guaíba-RS (figura 40).

Figura 40 – Localização das referências de nível utilizadas próximas às estações linimétricas/linigráficas e as linhas que as conecta.

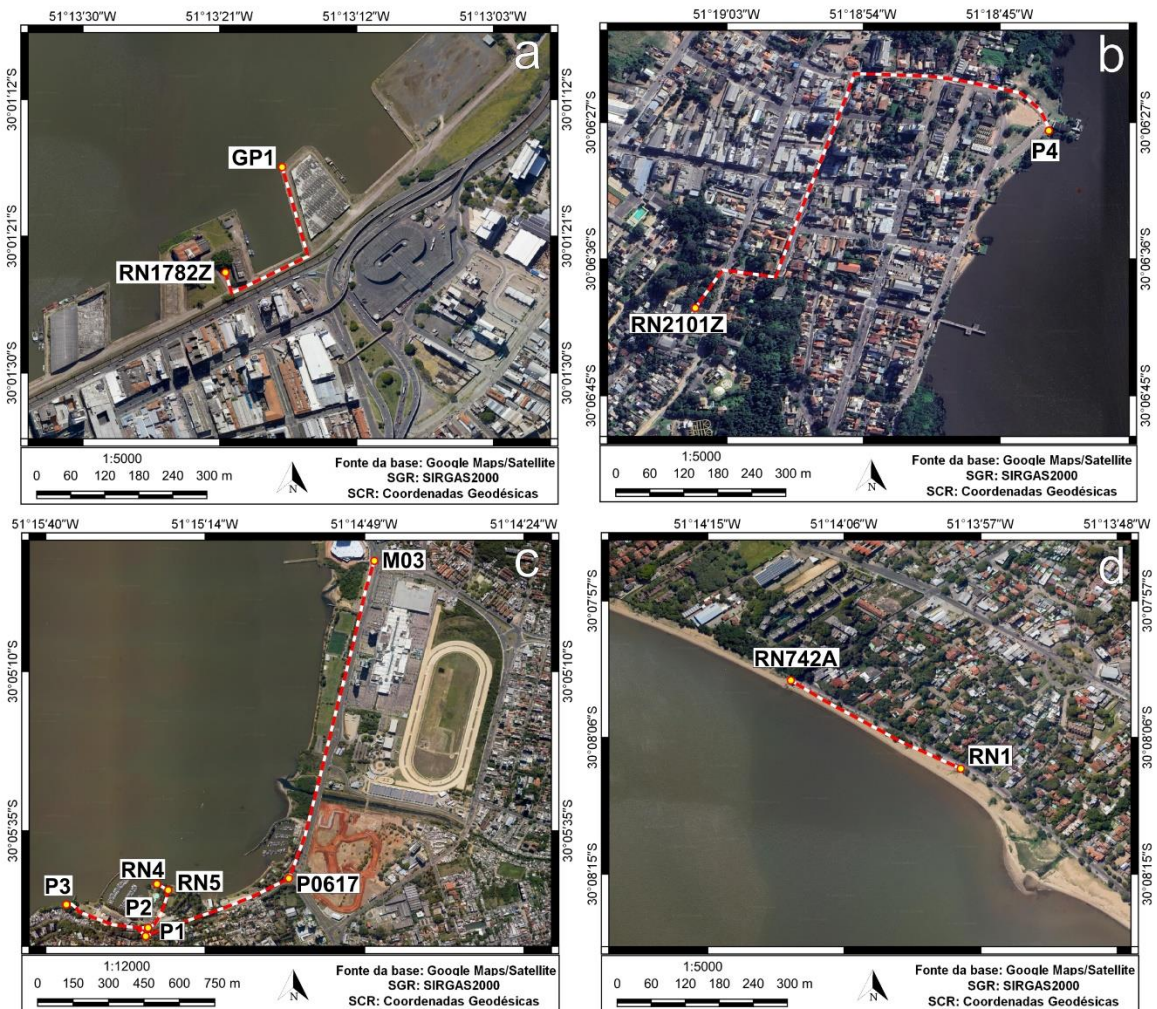


Fonte: Elaboração própria.

Na segunda etapa foram efetuados os nivelamentos geométricos para conectar as RRNN da RAAP e RRCM às das estações linimétricas/linigráficas, para a conexão

terra-água-terra e comparação entre o nivelamento terrestre e o nivelamento hidrográfico orbital para a avaliação da aplicabilidade do método (figura 41).

Figura 41 – Linhas de nivelamento geométrico realizadas no Cais Mauá C6 (a), Terminal CatSul Guaíba (b), Cristal (c) e Ipanema (d), identificadas pela linha tracejada.



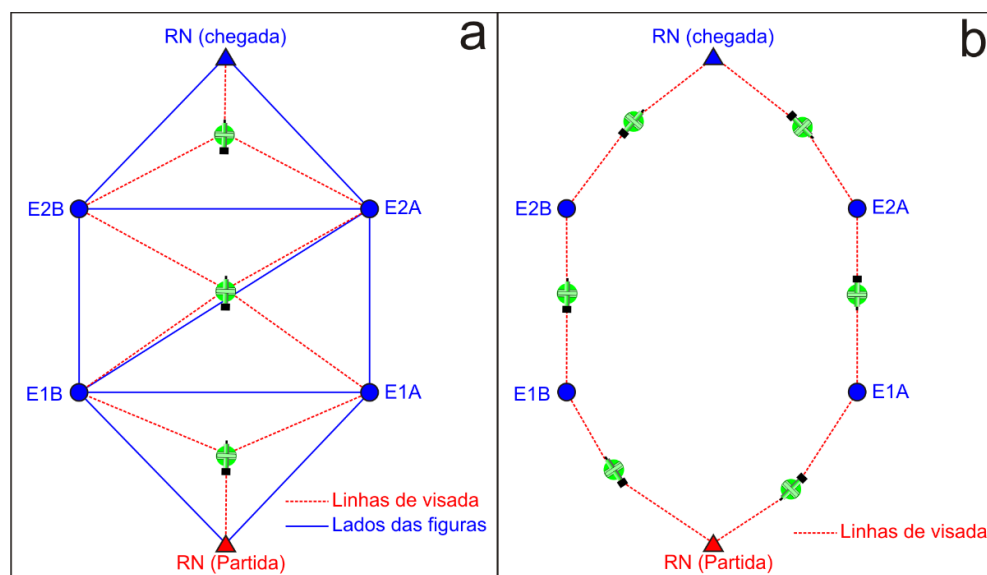
Fonte: Elaboração própria.

O nivelamento geométrico no Cais Mauá C6 partiram da RN1782Z até o ponto chamado GP1 (figura 41a) e em Terminal CatSul Guaíba, o nivelamento geométrico foi executado entre a RN2101Z e o ponto denominado P4 (figura 41b). Em Cristal, o nivelamento geométrico iniciou-se na RN M03 indo até o ponto denominado P1, passando, por meio de irradiação, pela RN P0617 (RRCM). Do ponto P1 o

nivelamento geométrico foi estendido até o ponto P2 e do ponto P2 o nivelamento geométrico foi finalizado nos pontos P3 e RN4/RN5 (referências de nível pertencentes à CPRM), conforme mostra a figura 41c. A RN P0617 foi usada como controle para erros grosseiros e não como uma referência para o nivelamento geométrico e ajustamento devido ao seu tipo de materialização e localização, como pino cravado na guia (meio-fio), o que traz dúvidas quanto a sua estabilidade ao longo do tempo e, conseqüentemente, a consistência do seu valor de altitude. O Nivelamento geométrico executado em Ipanema, partiu da RN742A até a RN01 como mostra a figura 41d.

O nivelamento geométrico foi executado utilizando o método das linhas paralelas simultâneas, onde as linhas de nivelamento e contranivelamento são medidas em uma única passagem do nível. Com este método é possível a construção de figuras fechadas (triângulos) que permitem a aplicação do ajustamento pelo MMQ, a partir do método dos correlatos e paramétrico. O nível foi estacionado de forma a manter a equidistância para os pontos adjacentes visados para minimizar ao máximo os efeitos conjugados da refração atmosférica e curvatura da Terra (figura 42).

Figura 42 – Desenho esquemático dos nivelamentos geométricos executados em forma de rede, com nivelamento e contranivelamento executados de forma simultânea (a), com exceção do nivelamento geométrico realizado entre os pontos P1 e P2 (b), de forma tradicional com nivelamento e contranivelamento em épocas distintas.

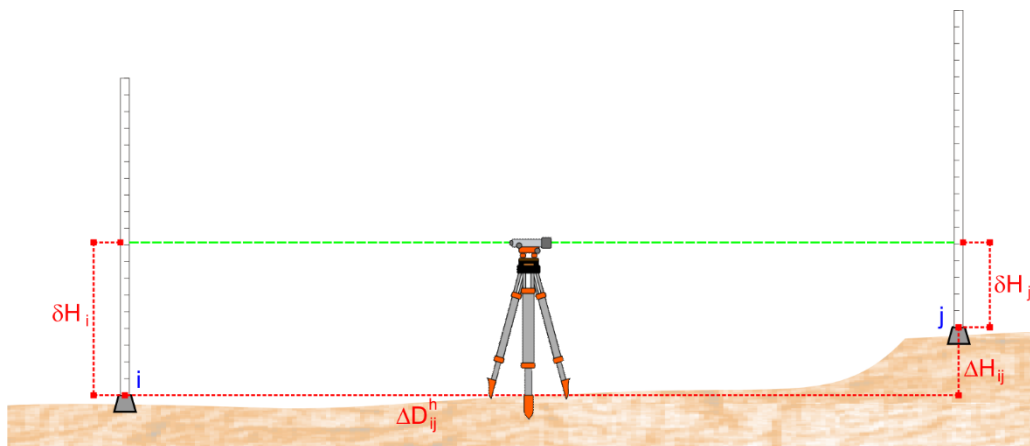


Fonte: Elaboração própria.

No caso da figura 42a, a montagem das figuras foi realizada em forma de treliça (com uma diagonal), resultando em dois triângulos por quadrilátero (exceto a partida e a chegada). A única exceção ao método foi o nivelamento geométrico entre os pontos P1 e P2 em Cristal. Nesta linha de nivelamento foi utilizado o método convencional do nivelamento e contranivelamento com passagem do nível em períodos distintos (figura 42b), sendo que neste caso há apenas uma figura a ser ajustada.

Os desníveis são calculados em função das leituras de ré ( $\delta H_i$ ) e vante ( $\delta H_j$ ), a partir da equação 83, cujos elementos são apresentados na figura 43. Neste caso há duas ré e duas vantes, com possibilidade de até quatro combinações para a obtenção dos desníveis, com exceção das estações de partida e chegada.

Figura 43 – Elementos para o cálculo dos desníveis a partir do nivelamento geométrico.



Fonte: Elaboração própria.

$$\Delta H_{ij} = \delta H_i - \delta H_j \quad (83)$$

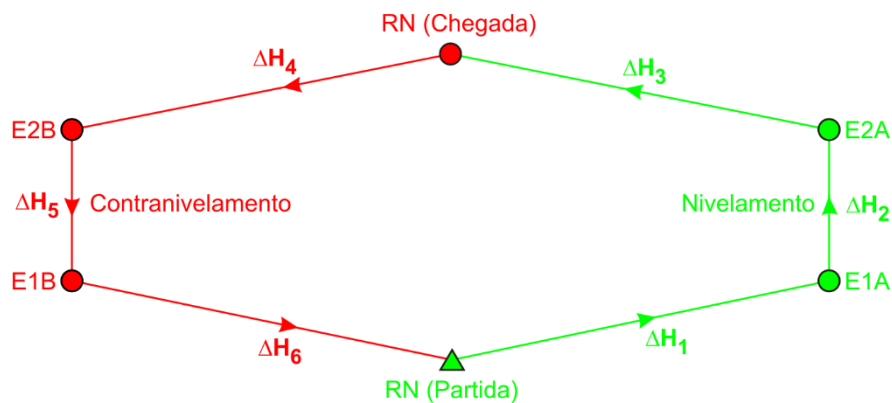
Os ajustamentos dos nivelamentos geométricos foram realizados, para comparação entre metodologias, por simples compensação do erro de fechamento entre o nivelamento e o contranivelamento e pelo MMQ. No MMQ foi utilizado o método dos correlatos a partir de uma planilha eletrônica e pelo método paramétrico utilizando o software Adjust, desenvolvido pela empresa CG Consulting, usado para validar os cálculos realizados a partir da planilha eletrônica. Foi utilizada as distâncias



entre as estações como peso para o ajustamento. A aceitabilidade do ajustamento foi aferida a partir do teste qui-quadrado a um nível de confiança de 95% (significância de 5%).

Pelo método da simples compensação do erro de fechamento, cada lado do nivelamento é considerado independente, com o lado direito sendo o nivelamento de ida e o lado esquerdo como contranivelamento (invertendo o sentido do caminhamento) como mostra a figura 44, baseada no desenho esquemático dos nivelamentos geométricos apresentado na figura 42b.

Figura 44 – Desenho esquemático para a montagem do ajustamento do nivelamento e contranivelamento (em épocas distintas).



Fonte: Elaboração própria.

As distâncias de cada visada são medidas durante o processo de nivelamento geométrico. A distância total nivelada é calculada a partir do somatório de todas as distâncias horizontais medidas no nivelamento e contranivelamento ( $\sum_{i=1}^n \Delta D_i^n$ ), exceto dos pontos irradiados se houver.

A discrepância entre os valores absolutos dos somatórios dos desníveis do nivelamento ( $\sum_{i=1}^n \Delta H_i$ ) e contranivelamento ( $\sum_{j=1}^n \Delta H_j$ ), traduzido como erro de fechamento, é dada pela equação 84.

$$v\Delta H_{ij} = \left| \sum_{i=1}^n \Delta H_i \right| - \left| \sum_{j=1}^n \Delta H_j \right| \quad (84)$$

Para a distribuição dos erros foi usado o método dos pesos das distâncias, onde os desníveis compensados são calculados a partir da equação 85. A equação 85 é baseada na união entre as equações 39 e 41 apresentadas no capítulo 2.10.3, com a atualização da simbologia utilizada.

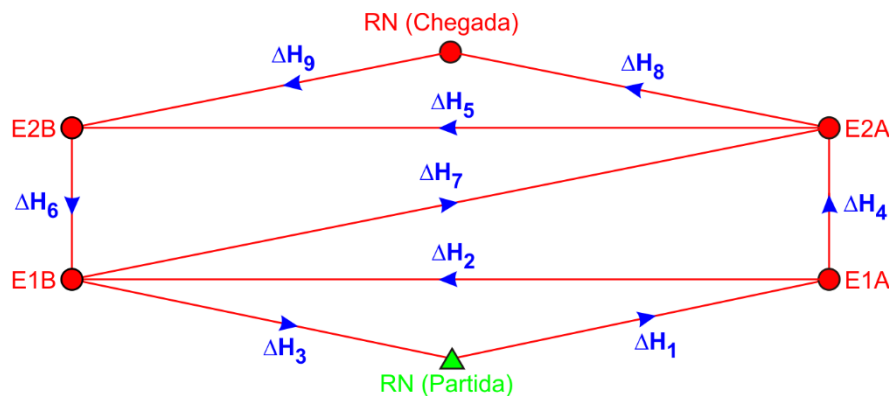
$$\Delta H_i^C = \Delta H_i + \nabla \Delta H_{ij} \cdot \frac{\Delta D_i^h}{\sum_{i=1}^n \Delta D_i^h} \quad (85)$$

Um parâmetro de qualidade que é possível calcular com o método é a precisão, em  $\text{mm} \cdot \sqrt{k}$ , com  $k$  denotando a distância em quilômetros, por meio da equação 86.

$$\text{Precisão} = \frac{|\nabla \Delta H_{ij} \cdot 1000|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta D_i^h} / 1000} \quad (86)$$

No método dos correlatos do MMQ é necessário montar as equações de condição. Partindo do desenho esquemático dos nivelamentos geométricos apresentado na figura 45 monta-se a rede que será ajustada conforme mostra a figura 42a.

Figura 45 – Desenho esquemático para a montagem do ajustamento do nivelamento e contranivelamento (medidas simultâneas) pelo método dos correlatos.



Fonte: Elaboração própria.

Na figura 45  $\Delta H$  é o desnível da linha e a seta indica o sentido do caminhamento. Neste exemplo há 9 linhas ( $n$ ), 5 pontos livres ( $u$ ) e 1 ponto de controle (RN de partida). Subtraindo o número de linhas do número de pontos livres ( $r = n - u$ ) têm-se 4 equações de condição, inerentes aos quatro triângulos formados. Dentre as várias

possibilidades, são apresentadas na equação 87 um exemplo de conjunto de quatro equações de condição.

$$\begin{cases} \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 = 0 \\ -\Delta H_2 + \Delta H_4 - \Delta H_7 = 0 \\ \Delta H_7 + \Delta H_5 + \Delta H_6 = 0 \\ -\Delta H_5 + \Delta H_8 + \Delta H_9 = 0 \end{cases} \quad (87)$$

O sinal do desnível depende do sentido na qual se monta a equação de condição e do sentido na qual foi montada a rede (direção da seta), neste exemplo a montagem das equações de condição seguiu o sentido anti-horário. Como se trata de um sistema linear, os coeficientes das linhas já representam as derivadas parciais, resultando na matriz B de dimensões r x n:

$$B = \begin{array}{c|cccccccccc|l} & \Delta H_1 & \Delta H_2 & \Delta H_3 & \Delta H_4 & \Delta H_5 & \Delta H_6 & \Delta H_7 & \Delta H_8 & \Delta H_9 & \\ \hline & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Eq. 1} \\ & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & \text{Eq. 2} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & \text{Eq. 3} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \text{Eq. 4} \end{array}$$

O vetor  $\nabla \Delta H$  dos erros de fechamento para cada triângulo tem dimensões r x 1 (equação 88).

$$\nabla \Delta H = \begin{cases} \nabla \Delta H_1 = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \\ \nabla \Delta H_2 = -\Delta H_2 + \Delta H_4 - \Delta H_7 \\ \nabla \Delta H_3 = \Delta H_7 + \Delta H_5 + \Delta H_6 \\ \nabla \Delta H_4 = -\Delta H_5 + \Delta H_8 + \Delta H_9 \end{cases} \quad (88)$$

A matriz de pesos (cujas observações devem ser independentes), é uma matriz diagonal com dimensões n x n, cujos valores são multiplicados pela variância arbitrada a priori ( $\sigma_0^2$ ):

$$P = \begin{array}{c|cccccccccc|} & P_{11} & & & & & & & & & \\ & & P_{22} & & & & & & & & \\ & & & P_{33} & & & & & & & \\ & & & & P_{44} & & & & & & \\ & & & & & P_{55} & & & & & \\ & & & & & & P_{66} & & & & \\ & & & & & & & P_{77} & & & \\ & & & & & & & & P_{88} & & \\ & & & & & & & & & P_{99} & \end{array}$$

Nos ajustamentos foram utilizadas como critério de peso as distâncias de cada linha de nivelamento geométrico. As equações usadas para o cálculo do vetor dos

multiplicadores de Lagrange (K – equação 45), vetor dos resíduos (V – equação 46), do vetor das leituras ajustadas ( $L_a$  – equação 47), da matriz variância-covariância das leituras ajustadas ( $\Sigma L_a$  – equação 48) e da variância a posteriori ( $\hat{\sigma}_0^2$  - equação 54) já foram apresentadas no capítulo 2.10.3 (Ajustamento do nivelamento geométrico). A equação usada no cálculo do qui-quadrado também já foi apresentada ( $\chi_{calculado}^2$  - equação 61) no capítulo 2.11.2 (Testes estatísticos).

O ajustamento do nivelamento geométrico pelo método paramétrico do MMQ se inicia pela montagem do vetor de medidas  $y$ , de dimensão  $n \times 1$ , que são os desníveis observados (para o exemplo baseado na figura 45), aqui apresentado na forma transposta ( $1 \times n$ ):

$$y^T = [\Delta H_1 \quad \Delta H_2 \quad \Delta H_3 \quad \Delta H_4 \quad \Delta H_5 \quad \Delta H_6 \quad \Delta H_7 \quad \Delta H_8 \quad \Delta H_9]$$

O número de graus de liberdade ou redundância ( $r = n - u$ ) e a matriz de pesos (P) são iguais aos utilizados no método dos correlatos. Na equação 89 é apresentado o conjunto de nove equações que relacionam os parâmetros (altitudes) aos desníveis [F( $X_a$ )].

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta H_1 = H_{E1A} - H_{RN(Partida)} \\ \Delta H_2 = H_{E1B} - H_{E1A} \\ \Delta H_3 = H_{RN(Partida)} - H_{E1B} \\ \Delta H_4 = H_{E2A} - H_{E1A} \\ \Delta H_5 = H_{E2B} - H_{E2A} \\ \Delta H_6 = H_{E1B} - H_{E2B} \\ \Delta H_7 = H_{E2A} - H_{E1B} \\ \Delta H_8 = H_{RN(Chegada)} - H_{E2A} \\ \Delta H_9 = H_{E2B} - H_{RN(Chegada)} \end{array} \right. \quad (89)$$

Como o método dos correlatos, se trata de um modelo linear, assim as derivadas parciais do conjunto de equações 88 resultam na matriz A de dimensões  $n \times u$ :

$$A = \begin{array}{c|ccccc|c} & H_{E1A} & H_{E2A} & H_{RN(Chegada)} & H_{E2B} & H_{E1B} & \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \text{Eq. 1} \\ & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & \text{Eq. 2} \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & \text{Eq. 3} \\ & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \text{Eq. 4} \\ & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & \text{Eq. 5} \\ & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & \text{Eq. 6} \\ & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & \text{Eq. 7} \\ & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & \text{Eq. 8} \\ & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & \text{Eq. 9} \end{array}$$



O método paramétrico também necessita de um vetor dos parâmetros aproximados ( $X_0$ ), de dimensões  $u \times 1$ , sendo estes parâmetros arbitrados, geralmente usando o valor 0, exceto para o(s) ponto(s) de controle, que já possui(em) parâmetros conhecidos:

$$X_0 = \begin{bmatrix} H_{E1A}^0 \\ H_{E2A}^0 \\ H_{RN(\text{Chegada})}^0 \\ H_{E2B}^0 \\ H_{E1B}^0 \end{bmatrix}$$

Dos parâmetros aproximados são calculados os valores para o vetor dos desníveis aproximados ( $L_0$ ) por meio do conjunto de equações 90.

$$L_0 = \begin{bmatrix} H_{E1A}^0 - H_{RN(\text{Partida})}^0 \\ H_{E1B}^0 - H_{E1A}^0 \\ H_{RN(\text{Partida})}^0 - H_{E1B}^0 \\ H_{E2A}^0 - H_{E1A}^0 \\ H_{E2B}^0 - H_{E2A}^0 \\ H_{E1B}^0 - H_{E2B}^0 \\ H_{E2A}^0 - H_{E1B}^0 \\ H_{RN(\text{Chegada})}^0 - H_{E2A}^0 \\ H_{E2B}^0 - H_{RN(\text{Chegada})}^0 \end{bmatrix} \quad (90)$$

O vetor  $L_{\text{obs}}$  das diferenças entre os desníveis observados e os desníveis aproximados, de dimensões  $n \times 1$ , é dado pelo conjunto de equações 91.

$$L_{\text{obs}} = \begin{bmatrix} L_1 = y_1 - L_{01} \\ L_2 = y_2 - L_{02} \\ L_3 = y_3 - L_{03} \\ L_4 = y_4 - L_{04} \\ L_5 = y_5 - L_{05} \\ L_6 = y_6 - L_{06} \\ L_7 = y_7 - L_{07} \\ L_8 = y_8 - L_{08} \\ L_9 = y_9 - L_{09} \end{bmatrix} \quad (91)$$

Assim como no método dos correlatos, foi usado como critério de peso nas observações as distâncias de cada linha de nivelamento geométrico. As equações do cálculo do vetor correção ( $X$  – equação 42), vetor dos parâmetros ajustados ( $X_a$  –

equação 43), da matriz variância-covariância dos parâmetros ajustados ( $\Sigma X_a$  – equação 44) e da variância a posteriori ( $\hat{\sigma}_0^2$  - equação 54) foi mostrada no capítulo 2.10.3 (Ajustamento do nivelamento geométrico). A equação usada no cálculo do qui-quadrado, como já citado no método dos correlatos, foi apresentada ( $\chi_{calculado}^2$  - equação 61) no capítulo 2.11.2 (Testes estatísticos).

### 3.3.2 Conexão terra-água/água-terra via nivelamento trigonométrico

Considerado como um método terrestre, a conexão terra-água/água-terra foi realizada a partir do nivelamento trigonométrico, técnica Leap-Frog, permitindo a integração do nivelamento hidrográfico orbital (conexão água-água) ao nivelamento geométrico (conexão terra-terra). Foi aplicado o nivelamento trigonométrico com determinação indireta de distância a partir de leituras na mira, na estação linimétrica/linigráfica Cristal para fins de avaliação do método. O método aplicado por padrão foi o nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, com medida direta da distância a partir do distanciômetro da estação total, devido a sua aplicabilidade nas medidas da superfície da água e impossibilidade de emprego nas estações linigráficas automáticas/telemétricas, embora nas estações convencionais, as réguas linimétricas poderiam substituir as miras, porém, com qualidade inferior nas leituras e consequente cálculo das distâncias. As conexões foram efetuadas entre a superfície da água e as RRNN dos linímetros/linígrafos Cais Mauá C6 (GP1), Cristal (P3 e RN4), Ipanema (RN RN1) e Guaíba (P4) como mostra a figura 46.

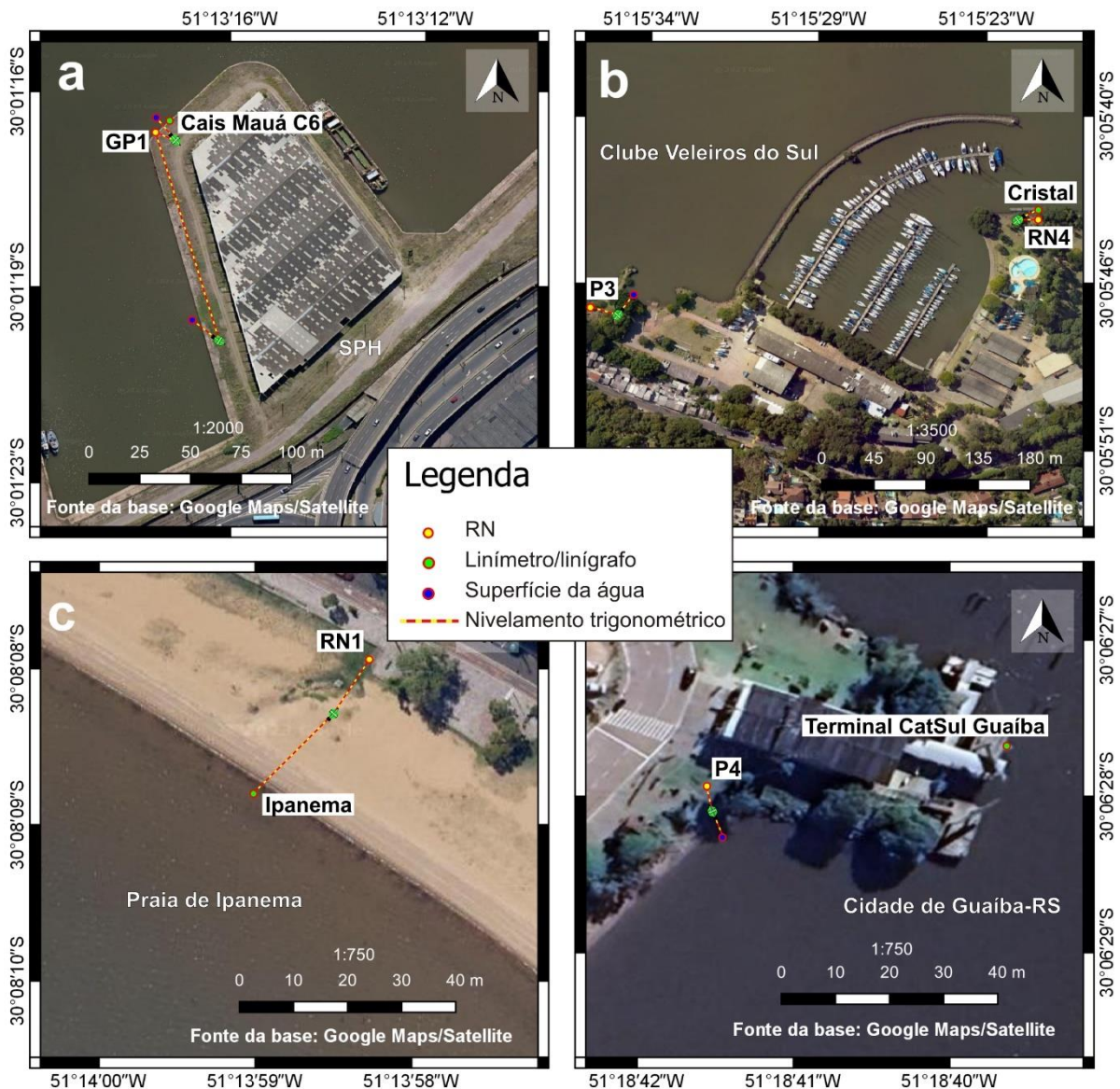
O objetivo foi determinar o desnível entre cada RN e o ponto de referência do linímetro/linígrafo ou “zero da régua”, possibilitando compatibilizar as medidas dos sensores altímetros orbitais e as observações dos linímetros/linígrafos para a mesma época.

No SPH (Cais Mauá C6), foram realizadas duas campanhas de nivelamento trigonométrico conectando GP1 à superfície da água: uma em 26/10/2018 e outra em 20/04/2023.

Em 26/10/2018 foi realizada a medida da superfície da água por meio do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância sobre a superfície da água sem prisma (refletor). A estação total foi configurada para efetuar medidas de distância inclinada de forma contínua a cada, aproximadamente, 0,5s. A gravação dos dados

obtidos foi feita em dispositivo externo (laptop). A campanha durou 05h 02m 37s (das 12h 07m 03s até às 17h 09m 40s). Desta forma, a variação da distância inclinada medida relaciona-se com a oscilação da superfície da água, mantendo-se a distância zenital (ângulo vertical) fixo.

Figura 46 – Conexões terra-água/água-terra no Cais Mauá C6 (a), Cristal (b), Ipanema (c) e Terminal CatSul Guaíba (d).

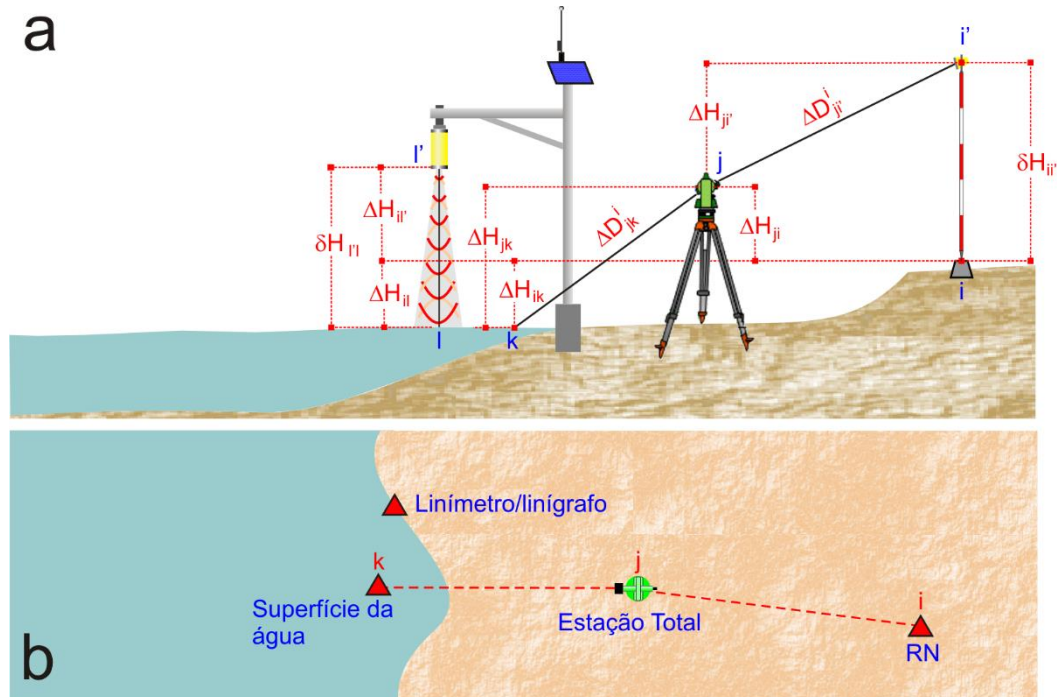


Fonte: Elaboração própria.

Ao final da seção de levantamento, foi realizada a medida no vértice GP1, medindo-se a distância inclinada, distância zenital e altura do prisma à ré. Tratando-

se estatisticamente a série de leituras na superfície da água, obteve-se o desnível entre GP1 e o centro ótico da estação total e deste até a superfície da água, permitindo o cálculo do desnível. A figura 47 mostra o princípio do método a partir do desenho esquemático já apresentado anteriormente na figura 11 (47a) e vista superior (47b) supondo uma estação i (RN do linímetro/linígrafo), j (centro ótico da estação total) e k (ponto de medida na superfície da água).

Figura 47 – Princípio do método de conexão terra-água/água-terra a partir do nivelamento trigonométrico com linígrafos automáticos telemétricos.



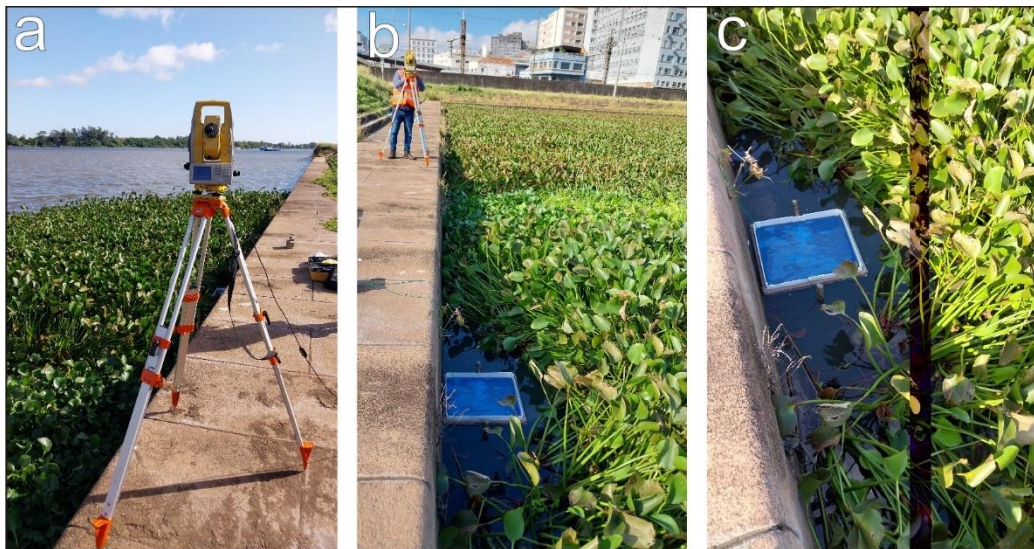
Fonte: Elaboração própria.

Na campanha de 20/04/2023 manteve-se o intervalo de gravação de dados de aproximadamente 0,5s, com gravação em dispositivo externo (laptop), porém, não diretamente sobre a superfície da água, mas usando um dispositivo flutuador para evitar a possível penetração do sinal do distanciômetro na água, com medida realizada sobre o centro aproximado do dispositivo. A campanha durou 1h 39m 58s (das 9h 45m 38s às 11h 25m 37s). O dispositivo flutuador foi instalado em uma abertura na vegetação, que evitava a agitação da água devido ao vento, como mostra a figura 48.



O desnível entre o ponto GP1 (i) e a superfície da água (k) para uma época t é dado pela equação 92 para o sentido terra-água e equação 93 para o sentido água-terra, onde o desnível entre GP1 (i) e o centro ótico da estação total (j) é dado pela equação 94 ( $\Delta H_{ji}^{RN'}$ ) e o desnível entre o centro ótico da estação total (j) e a superfície da água (k) pela equação 95 ( $\Delta H_{jk}^{RN'(t)}$ ), que é a média dos n desníveis calculados a partir das distâncias inclinadas medidas e da distância zenital.

Figura 48 – Medida da superfície da água com dispositivo flutuador, protegido entre a vegetação para evitar as ondulações da superfície da água devido aos ventos.



Fonte: Elaboração própria.

$$\Delta H_{ik}^{RN'(t)} = \Delta H_{jk}^{RN'(t)} - \Delta H_{ji}^{RN'} \quad (92)$$

$$\Delta H_{ki}^{RN'(t)} = \Delta H_{ji}^{RN'} - \Delta H_{jk}^{RN'(t)} \quad (93)$$

$$\Delta H_{ji}^{RN'} = \text{Cos}Z_{i'} \cdot \Delta D_{ji'}^i - \delta H_{i'} \quad (94)$$

$$\Delta H_{jk}^{RN'(t)} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{cos}Z_k \cdot \Delta D_{jk(i)}^j}{n} \quad (95)$$

Nas equações anteriores, Z é a distância zenital,  $\Delta D_{ji'}^i$  e  $\Delta D_{jk}^j$  são as distâncias inclinadas à ré e a vante respectivamente,  $\delta H_{i'}$  é a altura do prisma e n o número de medidas realizadas sobre a superfície da água.

As  $n$  distâncias válidas foram determinadas após a análise de *outliers* por meio de regressão linear e exclusão de valores de resíduos fora do intervalo de  $\pm 2\sigma$  (95% de significância).

Após a determinação do desnível entre GP1 e a superfície da água, para as duas campanhas, foram adquiridas as observações do linígrafo para o mesmo período em que se efetuou as medidas na superfície da água com a estação total, lembrando que o linígrafo Cais Mauá C6 faz uma medida do nível da água a cada 15 minutos. A média das leituras é dada pela equação 96.

$$\overline{\delta H_k^{L(t)}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta H_k^{L(t)}}{n} \quad (96)$$

A relação entre o nível da água medido pelo nivelamento trigonométrico e o ponto de referência das leituras no linígrafo é dada pela equação 67, já apresentada. Assim, para obter o desnível entre GP1 e a superfície da água, basta somar a leitura com o desnível entre GP1 e o “zero da régua”, também já apresentada anteriormente na equação 68.

As incertezas foram determinadas, no desnível à ré ( $s_{ji'}$ ), em função das precisões angular ( $s_z$ ) e linear ( $s_{\Delta D^j}$ ) da estação total e calculadas a partir da equação 97.

$$s_{ji'} = \sqrt{\Delta D_{ji'}^2 \cdot s_z^2 \cdot \text{sen}^2 Z_i + s_{\Delta D^j}^2 \cdot \text{cos}^2 Z_i} \quad (97)$$

As incertezas à vante foram calculadas a partir do desvio padrão (equação 98) e erro padrão (equação 99) da série de medidas na superfície da água.

$$ss = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (98)$$

$$s_{jk} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (99)$$

A incerteza total no desnível para conexão terra-água/água-terra é calculada a partir da equação 100.

$$s_{ik} = \sqrt{s_{ji'}^2 + s_{jk}^2} \quad (100)$$

Nas medidas, embora os valores sejam bem pequenos devido às distâncias e aos desníveis medidos, foram considerados os efeitos conjugados da curvatura da terra e da refração, cujo cálculo é realizado usando a equação 23 já apresentada.

Em Cristal foram realizadas 4 campanhas de nivelamento trigonométrico conectando a referência de nível P3 à superfície da água em 17/04/2023, 18/04/2023, 19/04/2023 e 09/06/2023. O maior número de levantamentos em cristal serviu para a avaliação do método usado além de ajudar a aperfeiçoar métodos, técnicas, instrumentos e acessórios. O quadro 08 mostra as datas, duração, início e fim das seções.

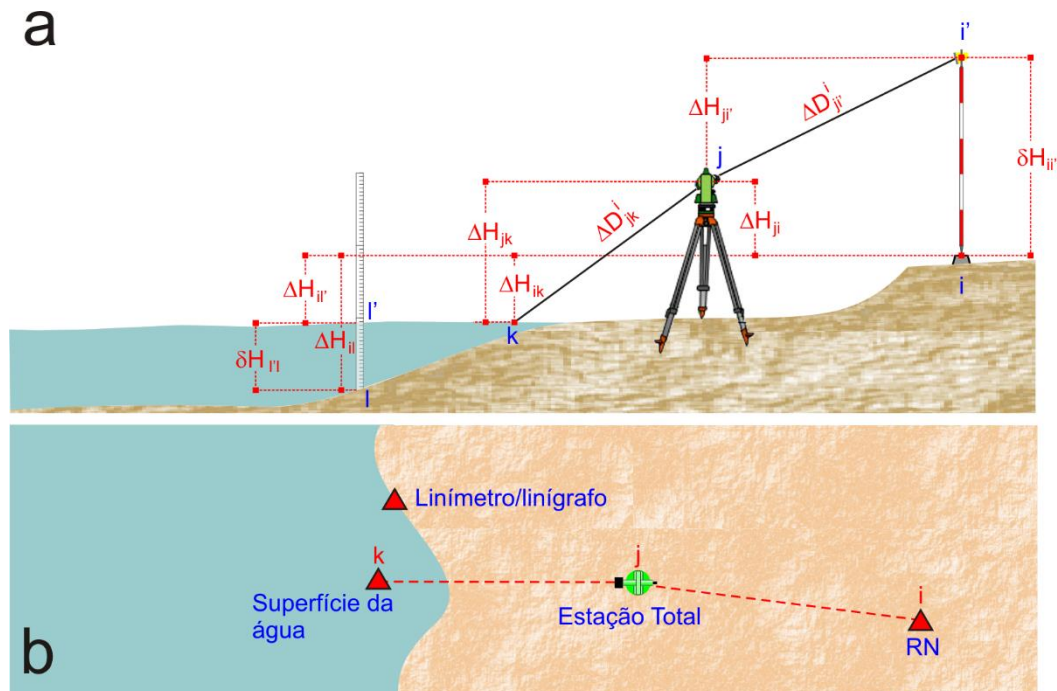
Quadro 08 – Datas, horário de início, fim e duração das campanhas de levantamento da superfície da água em Cristal.

<b>Data</b>	<b>Início</b>	<b>Fim</b>	<b>Duração</b>
17/04/2023	17h 10m 00s	17h 21m 19s	00h 11m 19s
18/04/2023	10h 53m 34s	14h 52m 57s	03h 59m 23s
19/04/2023	09h 18m 15s	13h 18m 02s	03h 59m 47s
09/06/2023	10h 07m 03s	11h 42m 44s	01h 35m 41s

Fonte: Elaboração Própria.

Todas as campanhas seguiram o mesmo procedimento realizado no SPH para a conexão entre o ponto GP1 e a superfície da água. A principal diferença é que ao invés de um linígrafo automático telemétrico, Cristal dispõe de réguas linimétricas convencionais. A relação entre o nível da superfície da água determinado pelo nivelamento trigonométrico e pelas observações da régua linimétrica é mostrada na figura 49.

Figura 49 – Princípio do método de conexão terra-água/água-terra a partir do nivelamento trigonométrico com réguas linimétricas.

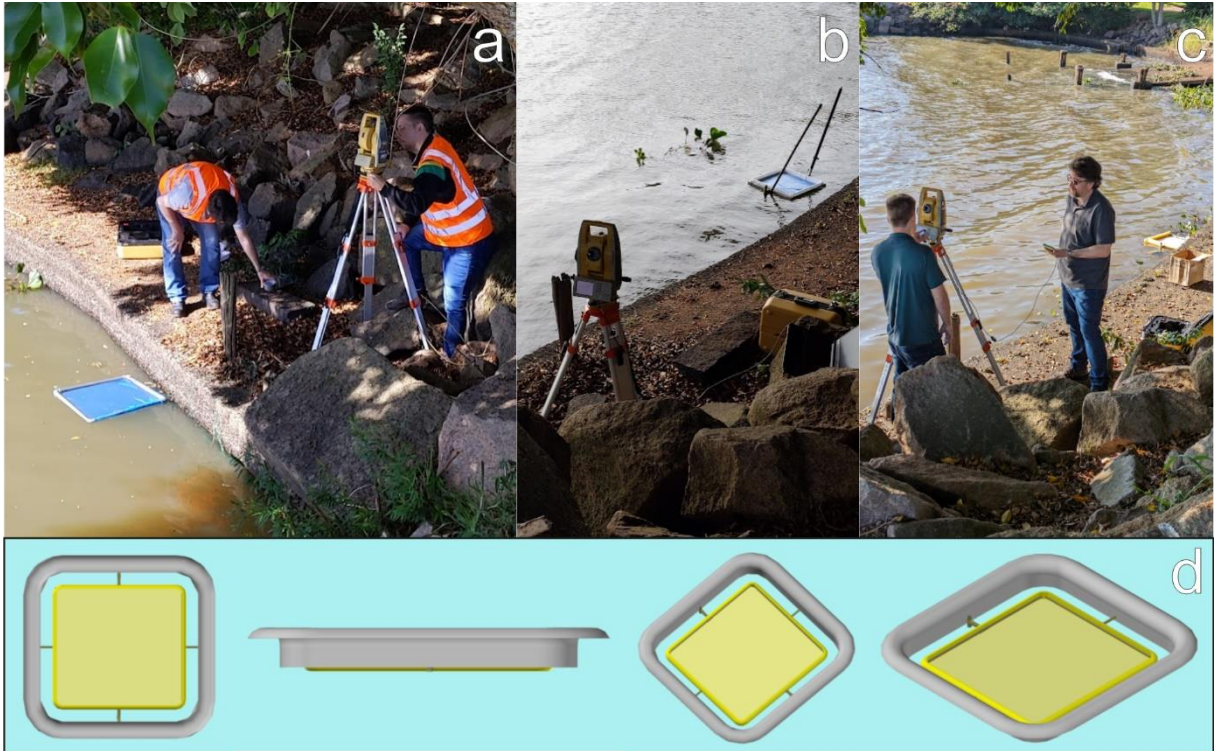


Fonte: Elaboração Própria.

Ao longo das campanhas de nivelamento trigonométrico foi sendo aprimorado o dispositivo flutuador a partir das observações de falhas dos protótipos. A primeira versão, mais simples, foi usada em 17/04/2023 (figura 50a), onde foi verificada a necessidade de adoção de pontos de ancoragem e barreiras laterais para evitar entrada de água em superfícies mais agitadas. A segunda versão, usada em 18/04/2023 e 19/04/2023 (figura 50b) já é dotada de pontos de ancoragem laterais, porém ainda suscetível a vazamentos devido ao material plástico utilizado como base de contato com a superfície da água. A terceira versão (figura 50c), já possui barreiras laterais mais altas e na figura 50d é apresentada uma projeção de um possível nova versão com anteparas para tranquilizar as águas em volta do dispositivo e evitar a entrada de água em situações de agitação da superfície.



Figura 50 – Nivelamento trigonométrico usando o dispositivo flutuador, sua evolução durante as campanhas de levantamento (a, b, c) e projeção de novo protótipo com proteção contra as ondulações da superfície da água (d).



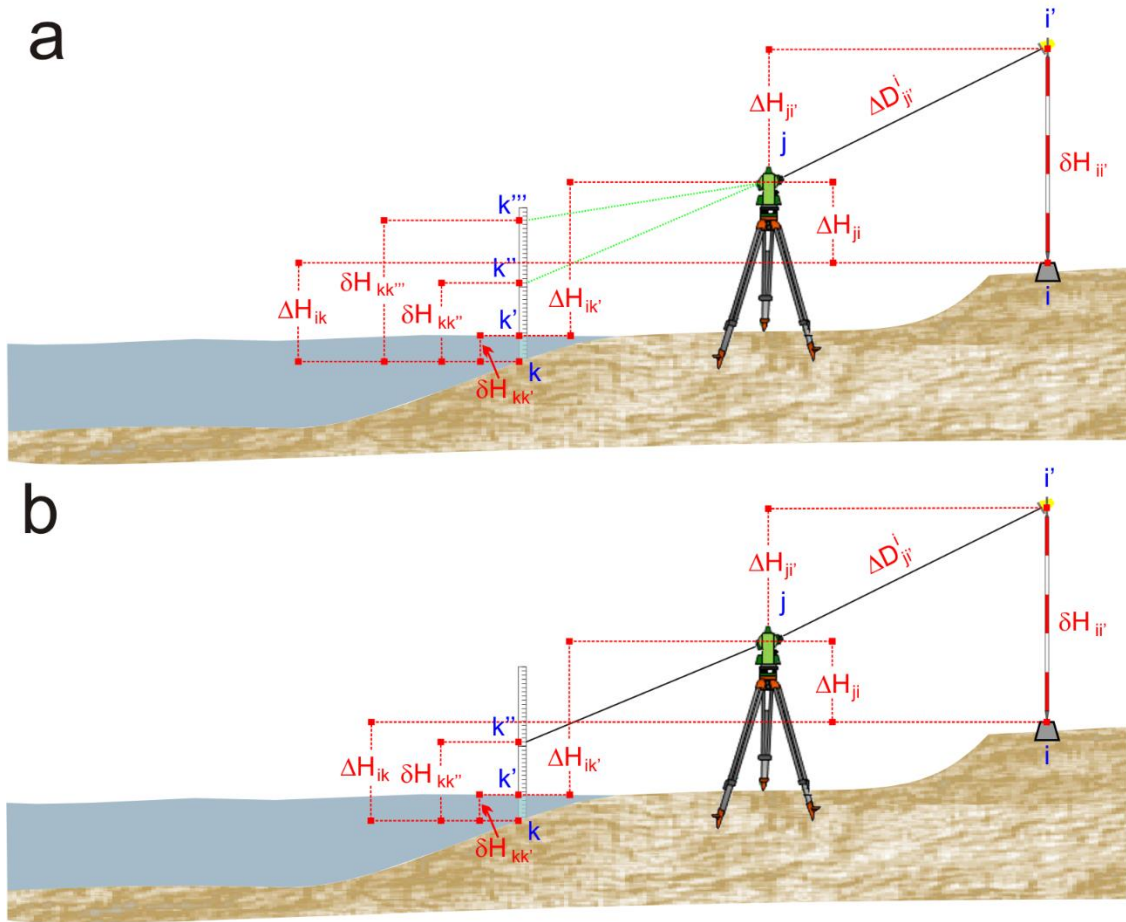
Fonte: Elaboração Própria.

Os cálculos dos desníveis seguem as equações 92, 93, 94 e 95, sendo (i) a representação da RN P3. A média das observações na régua linimétrica (equação 96) e incertezas (equações 97, 98, 99 e 100) também são as mesmas.

Na campanha de 18/04/2023 também foi realizada a conexão terra-água/água-terra usando o nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância e nivelamento trigonométrico com medida direta de distância entre a RN4 (CPRM) e a superfície da água usando a régua linimétrica. Nestes métodos às medidas à ré são sempre realizadas por meio do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, com bastão e prisma. À vante, para o nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância, duas leituras são realizadas na régua (uma inferior e outra superior, em valores inteiros) como se fosse uma mira. Para o nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, é efetuada uma medida de distância

em uma leitura inteira da régua linimétrica. A figura 51 mostra o princípio dos métodos com medida indireta de distância (figura 51a) e medida direta de distância (figura 51b).

Figura 51 – Desníveis determinados a partir do nivelamento trigonométrico com medida indireta da distância à vante (a) e medida direta de distância à vante (b). Ambos usam nivelamento trigonométrico com medida direta de distância à ré.



Fonte: Elaboração Própria.

Na figura 51a, as duas linhas tracejadas verdes indicam as leituras visuais na régua e na figura 51b a linha sólida em preto indica as medidas diretas de distância na régua, sem prisma à vante.

O desnível entre RN4 (i) e o “zero da régua” (k) é dado pela equação 101.

$$\Delta H_{ik_0}^{RN'} = \frac{\delta H_{kk'''} - \delta H_{kk''}}{\cot Z_{k'''} - \cot Z_{k''}} \cdot \cot Z_{k''} - \delta H_{kk''} - \cos Z_{j'} \cdot \Delta D_{ji'}^j - \delta H_{ii'} \quad (101)$$

O desnível entre a RN4 (i) e a superfície da água (k') é calculado pela equação 102 no sentido terra-água para uma época t. Para obter o valor no sentido água-terra, basta inverter o sinal.

$$\Delta H_{ik'}^{RN(t)} = \Delta H_{ik_0}^{RN'} + \delta H_{kk'}^{(t)} \quad (102)$$

Pelo nivelamento trigonométrico com medida sem prisma sobre a régua linimétrica, o desnível entre RN4 (i) e o “zero da régua” (k) é calculado a partir da equação 103.

$$\Delta H_{ik_0}^{RN'} = \cos Z_{k''} \cdot \Delta D_{jk''}^j - \delta H_{kk''} - \cos Z_{ji'} \cdot \Delta D_{ji'}^j - \delta H_{ji'} \quad (103)$$

A incerteza para o nivelamento trigonométrico com medida direta de distância é calculada a partir da equação 97, já apresentada. Para o nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância é usada a equação 104.

$$S_{jk''} = \sqrt{\frac{(\delta H_{kk''} - \delta H_{kk''})^2 \cdot \left( \frac{\sigma_{Z_{k''}}^2}{\text{sen}^4 Z_{k''}} + \frac{\sigma_{Z_{k'''}}^2}{\text{sen}^4 Z_{k'''}} \right) + (\sigma_{\delta H_{kk''}}^2 + \sigma_{\delta H_{kk''}}^2) \cdot (\cot Z_{k''} - \cot Z_{k''})^2}{(\cot Z_{k''} - \cot Z_{k''})^4}} \quad (104)$$

A incerteza total do desnível é dada pela equação 100, também já apresentada.

Em Ipanema também são usadas réguas linimétricas e o levantamento foi executado em 08/06/2023, por nivelamento trigonométrico com medida direta de distância, sem prisma, sobre o linímetro. O desnível entre a RN1 (CPRM) e o “zero da régua” foi calculado a partir das equações 102 e 103, apresentadas anteriormente. As incertezas foram calculadas a partir das equações 97 e 100.

Guaíba é dotado de uma estação automática telemétrica (Terminal CatSul Guaíba), onde foi empregada a medida da superfície da água com o dispositivo flutuador com duração de 01h 03m 16s (iniciada às 15h 42m 34s e finalizada às 16h 45m 49s). A determinação dos desníveis segue as equações 92, 93, 94 e 95, a média das observações do linígrafo a equação 96 e as equações 67 e 68 conduzem à determinação do “zero da régua” e o desnível entre o ponto P4 e a superfície da água em uma época t. As incertezas foram calculadas a partir das equações 97, 98, 99 e 100. A figura 52 mostra os levantamentos realizados em Ipanema (figura 52a) e Guaíba (figura 52b).

Figura 52 – Campanhas de levantamento executados em Ipanema (a), onde foram realizadas as medidas diretamente na régua linimétrica e Guaíba (b), onde foi usado o dispositivo flutuador.



Fonte: Elaboração Própria.

Uma vez conectadas as referências de nível sobre a terra à superfície da água, tratou-se do nivelamento hidrográfico orbital (conexão água-água).

### 3.3.3 Conexão água-água via nivelamento hidrográfico orbital

Com o objetivo de determinar os desníveis sobre a superfície da água entre os locais das estações linimétricas/linigráficas, foram examinadas, preliminarmente, as trilhas dos satélites altímetros radar e lidar que interceptam o Lago Guaíba, com a intenção de verificar a cobertura e consistência dos dados.

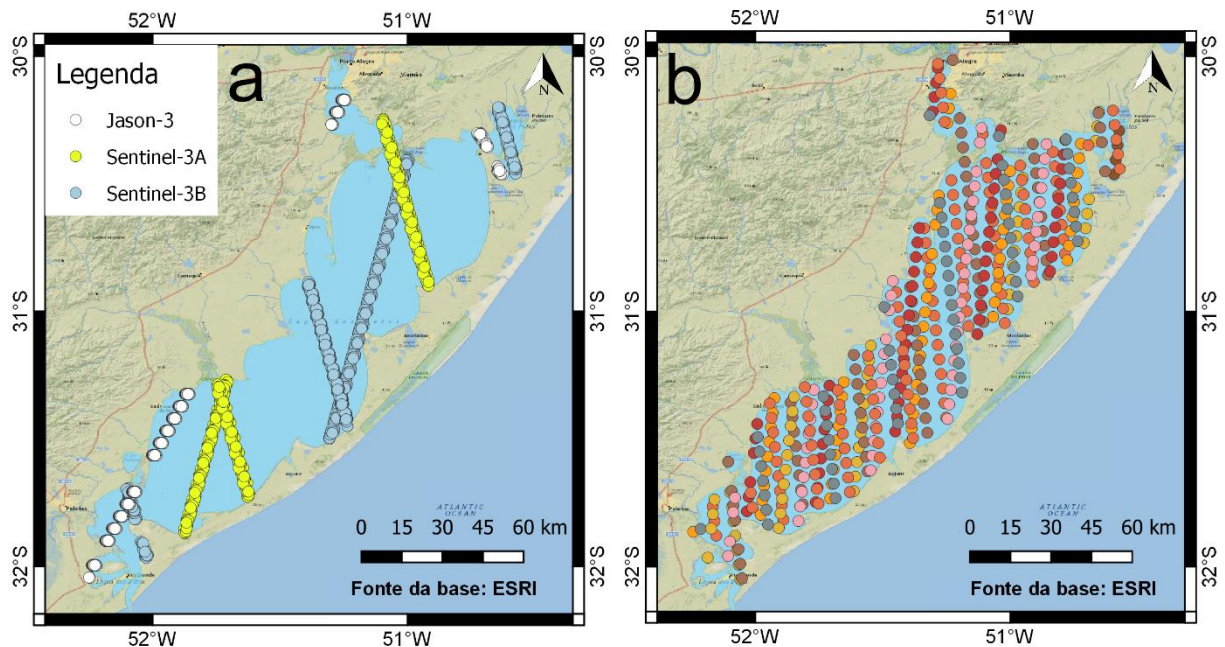
No complexo formado pela Lagoa dos Patos e Lago Guaíba foram usados os dados das missões altimétricas radar Sentinel (3A e 3B), Jason-3 e Cryosat-2, com frequência de dados de 1 Hz ao nível de processamento L2P. Neste nível de processamento já são disponibilizadas a anomalia do nível do mar ( $\Delta h^{SLA}$ ) e a altura superfície média do nível do mar ( $h^{MSS}$ ) em relação ao elipsoide WGS84, com as correções de propagação do sinal e geofísicas já implementadas. O cálculo das altitudes elipsoidais de cada ponto sobre a superfície da água ( $h^{SSH}$ ), sendo excluídos os pontos sobre a terra, foram executados a partir da equação 105.

$$h^{SSH} = \Delta h^{SLA} + h^{MSS} \quad (105)$$



A análise foi realizada com um ano de dados dos satélites radares altímetros (2019), com a compatibilização dos horários de passagem dos satélites para o fuso horário local (GMT -03:00). A figura 53a mostra a distribuição dos pontos das missões dos satélites radares altímetros Sentinel-3A, Sentinel-3B, Jason-3 e a figura 53b a distribuição dos pontos Cryosat-2.

Figura 53 – Distribuição dos pontos Sentinel-3A, Sentinel-3B e Jason-3 (a) e Cryosat-2 (b) no complexo Guaíba/Patos. Para o Cryosat-2 as cores indicam cada passagem do satélite sobre o complexo Guaíba/Patos.



Fonte: Elaboração Própria.

Para cada trilha em cada passagem do satélite foi aplicado um ajustamento linear e realizada a análise de *outliers* a partir dos resíduos do ajustamento, onde foram rejeitados os pontos fora do intervalo de  $\pm 3\sigma$  (99,7% de confiança). Por fim, foram medidas as distâncias desde o último ponto válido sobre a superfície da água até as margens do complexo Guaíba/Patos, estabelecendo-se desta forma a zona útil para os satélites radares altímetros (frequência de dados de 1 Hz).

Para a frequência de dados de 20 Hz, são disponibilizadas a distância sensor-superfície ( $R$ ), a altura do sensor em relação ao elipsoide WGS84 ( $h^{SAT}$ ) e as correções ionosférica, troposférica (seca e úmida) e marés (terrestre e polar)

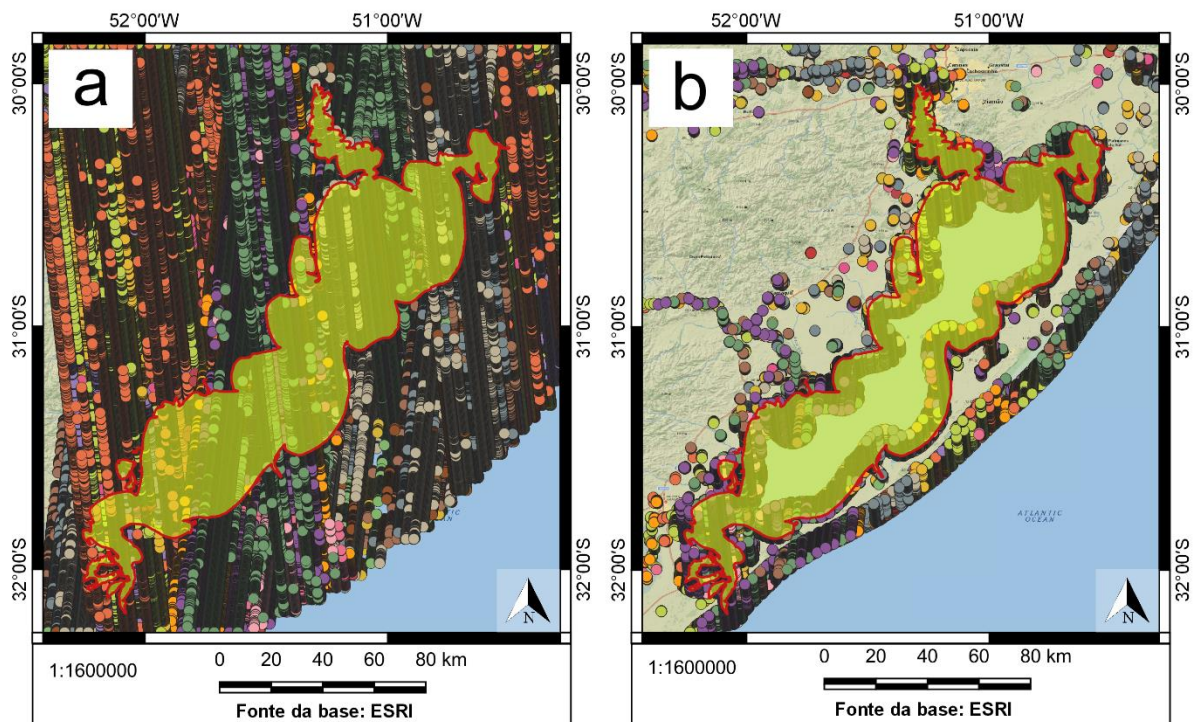
identificadas por Co. Assim, a altitude elipsoidal da superfície da água em relação ao elipsoide é dada pela equação 106, já apresentada como equação 13 mas repetida aqui para fins de melhor compreensão do método.

$$h^{SSH} = h^{SAT} - R - Co \quad (106)$$

Foram analisadas as trilhas sobre o Lago Guaíba, já apresentadas na figura 31, escolhendo por amostragem alguns ciclos da missão Sentinel-3A (algoritmos de *retracking* Ocean, Ice-Sheet, OCOG e interpolação entre eles), missão Jason-1 (Ice e Range), Jason-2 (Ice, Range e MLE), Jason-3 e Sentinel-6A (Ocean, MLE e OCOG) e Cryosat-2 (algoritmos Surface Height-1, 2 e 3).

Quanto ao sensor laser, foram analisados os dados do satélite lidar altímetro ICESat-2 sobre o complexo Guaíba/Patos a partir de dois produtos que servem à determinação da altura da superfície da água continental: ATL08 e ATL13. A figura 54 mostra a distribuição dos pontos dos dois produtos.

Figura 54 – Distribuição dos pontos ICESat-2 ATL08 (a) e ATL13 (b), mostrando a lacuna no interior da Lagoa dos Patos (b) devido à um equívoco na avaliação e uso de máscara para o corpo hídrico, que foi considerado como costa oceânica.

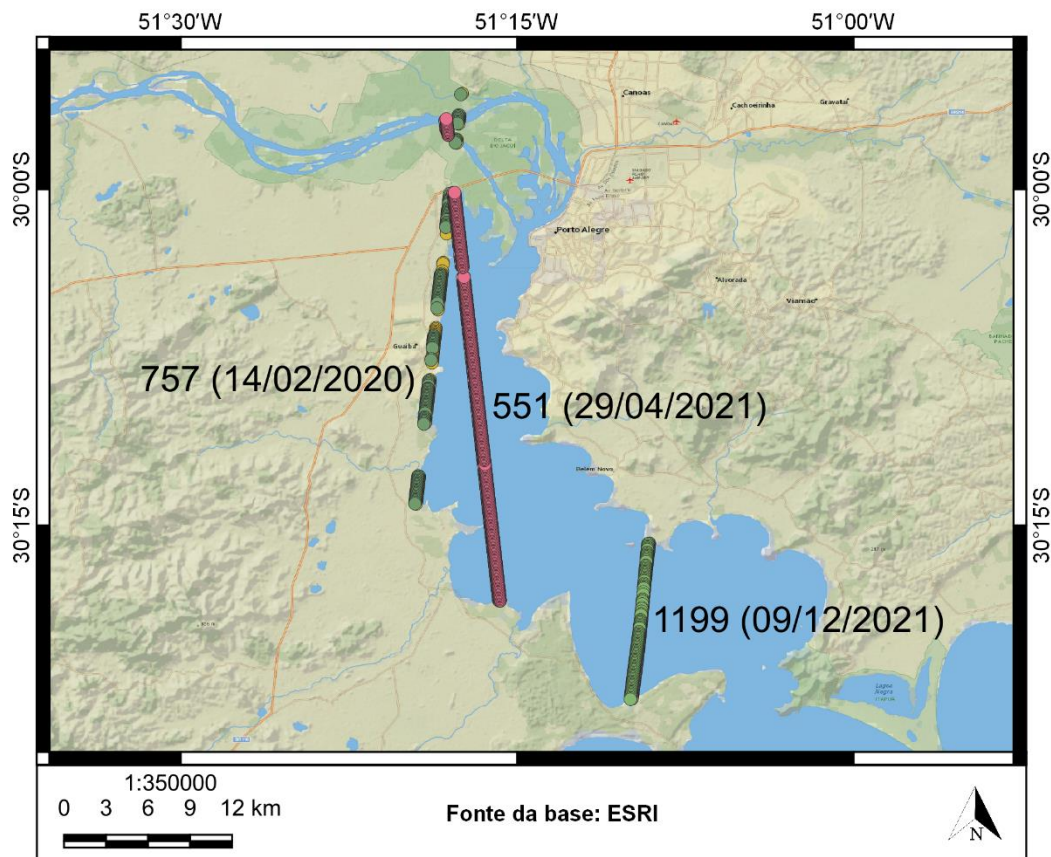


Fonte: Elaboração Própria.

Na figura 54 é possível perceber que para o produto ATL13, não há dados no interior da Lagoa dos Patos. Isto se deve ao fato de que o corpo hídrico é considerado zona costeira, onde há pontos somente até 7 km da costa (ou das margens). O produto ATL08 cobre todo o corpo d'água.

Os dois produtos foram comparados usando o teste t de *student*, com a hipótese básica de que as médias populacionais sejam iguais, usando a equação 62 já apresentada anteriormente. Foram utilizadas, escolhidas ao acaso, três faixas ICESat-2 (551 em 29/04/2021, 757 em 14/02/2020 e 1199 em 09/12/2021) com dois lados cada uma (respectivamente GT1R/GT1L, GT2R/GT2L e GT3L/GT3R) e alturas da superfície da água em relação ao elipsoide WGS84 nos produtos ATL08 e ATL13 como mostra a figura 55. Na identificação dos lados, GT é *Ground Track*; 1, 2 e 3 são os três feixes do sensor Atlas; e l é o lado esquerdo (*left*) e r o lado direito (*right*).

Figura 55 – Trilhas usadas para a comparação entre os produtos ATL08 e ATL13, com as cores das trilhas indicando cada lado para cada passagem.

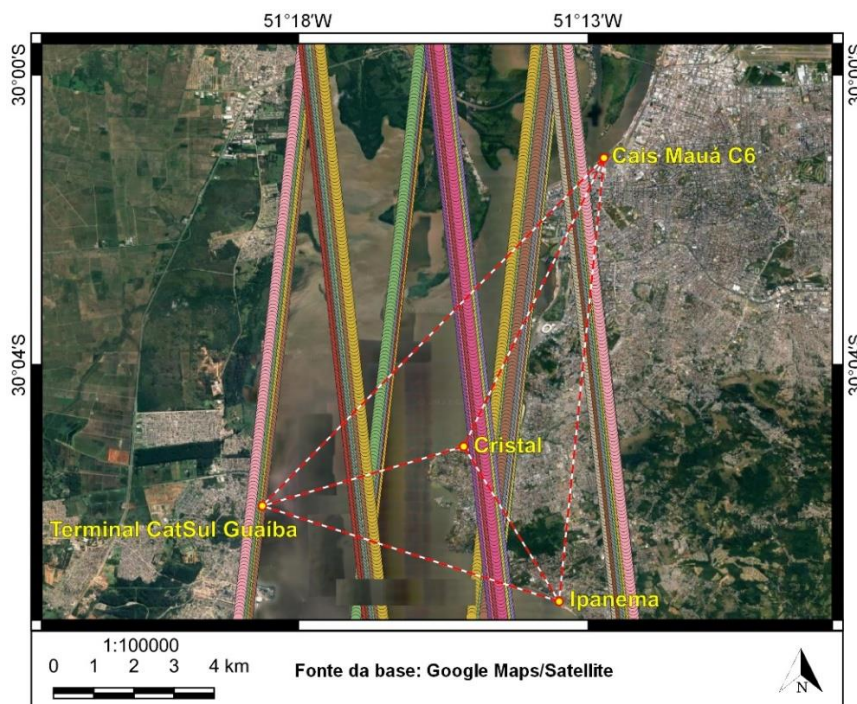


Fonte: Elaboração Própria.



Os desníveis sobre a superfície da água foram determinados sobre as trilhas do ICESat-2 ajustadas, entre os linímetros/linígrafos Cais Mauá C6, Cristal, Ipanema e Terminal CatSul Guaíba. Tendo o geóide como referência, as altitudes elipsoidais nas trilhas do satélite altímetro foram convertidas para altitudes ortométricas usando o modelo geoidal MapGeo2015. Foi feita a opção pelo MapGeo2015 em detrimento ao hgeoHNOR2020 devido a opção em utilizar a altitude normal-ortométrica (proveniente do reajustamento da rede altimétrica em 2011) das referências de nível da RAAP e não a altitude normal determinada a partir do reajustamento da RAAP com números geopotenciais no ano de 2018. Mesmo que haja incompatibilidade entre as altitudes ortométricas e normais-ortométricas, espera-se que, de forma relativa, os valores de desnível se equivalham ao nível subcentimétrico. Mais dois motivos levaram ao uso do MapGeo2015: a RRCM de Porto Alegre que está conectada à RAAP a partir das altitudes normais-ortométricas e a preocupação com a propagação do erro sistemático, já que o hgeoHNOR2020 é baseado no MapGeo2015. A figura 56 mostra as trilhas usadas em relação às linhas de nivelamento hidrográfico orbital.

Figura 56 – Localização das trilhas em relação aos linímetros/linígrafos, com a faixa 757 inclinada para leste e a faixa 551 inclinada para oeste (orientação ascendente). As cores representam as diversas passagens do ICESat-2 pela área de estudo.



Fonte: Elaboração própria.

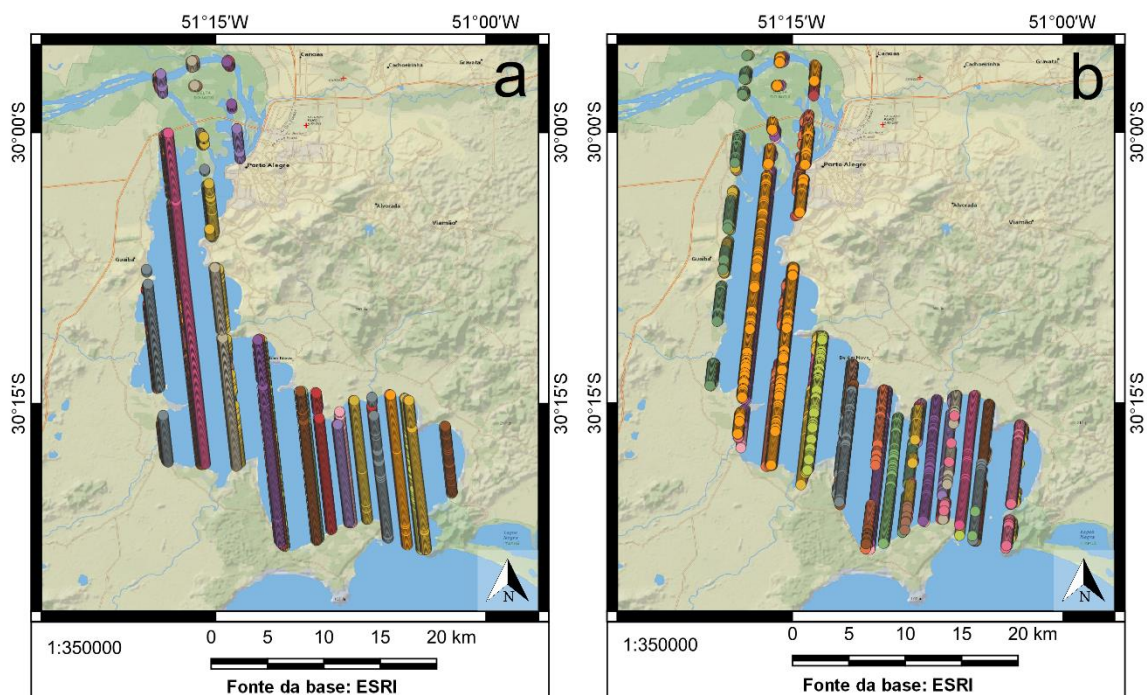


Duas faixas ICESat-2 atravessam o Lago Guaíba: A faixa 551 (ascendente – sentido sul/norte) e a faixa 757 (descendente – sentido norte/sul). Visando trabalhos futuros de estabelecimento de um modelo de topografia dinâmica (MDT) da superfície do Lago Guaíba, unindo dados do satélite lidar altímetro com dados dos satélites radares altímetros, foram aproveitadas as faixas que passam na porção sul: as faixas 993 (ascendente – sentido sul/norte) e 1199 (descendente – sentido norte/sul).

Como o sensor ATLAS efetua as medidas em três pares de trilhas (GT1, GT2 e GT3), separadas por uma distância de aproximadamente 3 km entre os pares e 90 m entre cada lado de cada par (esquerda-L e direita-R), há boa cobertura sobre o Lago Guaíba, como mostra a figura 57.

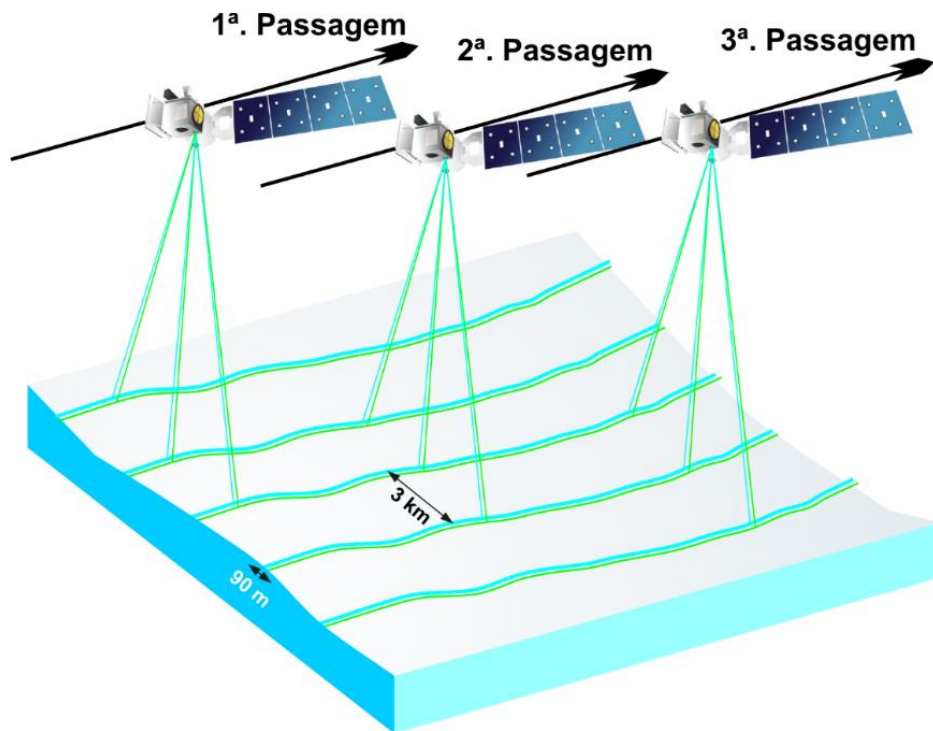
Lembrando que a órbita do satélite é variável, portanto as faixas não serão coincidentes em todas as passagens do satélite pelo corpo d'água. Porém, sempre haverá sobreposição de trilhas, por exemplo, a trilha GT1R em uma passagem pode estar sobreposta à trilha GT2L de uma outra passagem e à trilha GT3R de uma nova passagem como ilustrado pela figura 58.

Figura 57 – Conjunto de trilhas para as faixas 551 e 993 (a), 757 e 1199 (b) que interceptam o Lago Guaíba.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 58 – Sobreposição de trilhas e passagens do satélite ICESat-2, favorecendo a cobertura espacial no Lago Guaíba.



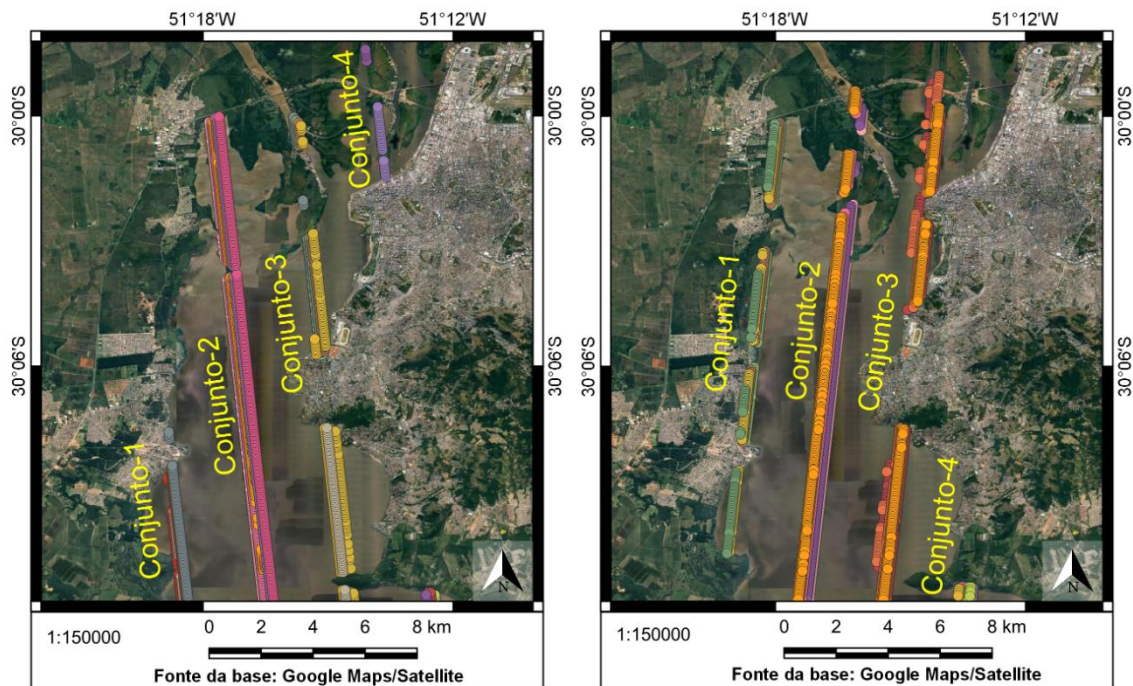
Fonte: Elaboração própria.

Devido a mobilidade da órbita do satélite ICESat-2, diferentes pares de trilhas e diferentes lados, em datas distintas, se agrupam formando novos conjuntos de trilhas bem definidos. Assim, os conjuntos foram renomeados para Conjunto-1, Conjunto-2, ..., Conjunto-n, a partir da margem direita (oeste) do Lago Guaíba (figura 59).

Em cada conjunto foram realizadas as análises de *outliers* e os ajustamentos, analisando o melhor ajuste entre os quatro primeiros graus do polinômio pelo Critério de Informação de Akaike (AIC). Cabe ressaltar que as ondas na água, causadas pelo vento, são mitigadas pela suavização resultante do ajuste da curva. Do conjunto de trilhas foram determinadas a média espacial entre os lados de cada par medidas na mesma época, a média temporal para cada conjunto de dados e a média temporal pareada, onde são usadas apenas as trilhas que passam, na mesma época, por cada par de linímetros/linígrafos.

Os desníveis sobre a superfície da água foram determinados a partir do ponto ajustado em cada trilha mais próximos da estação linimétrica/linigráfica e, quando possível, a partir do ponto interpolado entre duas trilhas adjacentes.

Figura 59 – Identificação dos conjuntos de trilhas para as faixas 551 (a) e 757 (b) na área de estudo. As cores indicam as passagens do satélite sobre a área de estudo.



Fonte: Elaboração própria.

A análise dos valores aberrantes (*outliers*) em cada lado de cada par de trilhas foi realizado a partir dos resíduos do ajuste linear usando as altitudes elipsoidais de cada ponto da trilha, a um nível de confiança de 99% (significância de 1%).

Os pontos das trilhas que passaram pelo critério de análise de *outliers* tiveram as altitudes elipsoidais convertidas em altitudes ortométricas a partir dos valores de altura geoidal do MapGeo2015. Na etapa de processamento, foi aplicado o melhor ajuste de quatro graus do polinômio, determinadas as incertezas e estimados os valores ajustados, mesmo em locais onde não haviam observações originais.

Após a análise de *outliers* e conversão das altitudes elipsoidais em altitudes ortométricas, foi efetuado o ajustamento das trilhas. Foi analisado o melhor ajuste usando quatro graus do polinômio e o critério de informação Akaike (AIC) levando em consideração o número de parâmetros para cada grau do polinômio ( $k$ ), número de pontos na trilha ( $n$ ) e a variância dos resíduos ( $s^2$ ) de acordo com a equação 107.

$$AIC=2\cdot k+n\cdot Ln(s^2) \quad (107)$$

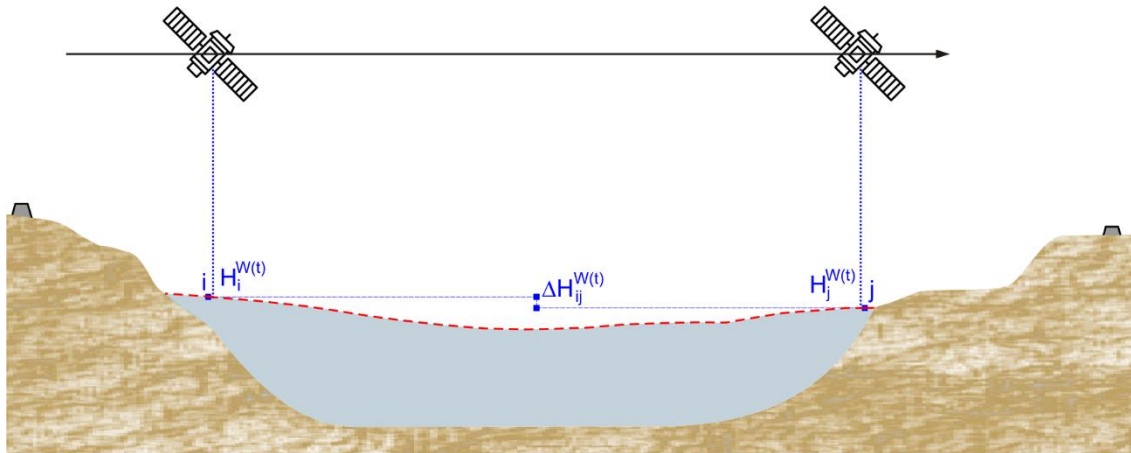
Definido o grau do polinômio, foram realizados os ajustamentos e estimados os valores dos pontos sobre cada trilha, inclusive as lacunas (pontos originalmente não medidos). Também foram calculados os desvios padrão levando em consideração incertezas obtidas na determinação das altitudes pelo sensor altímetro e a partir dos parâmetros da equação polinomial ajustada. A partir daí foram calculados os valores médios, espacial e temporal para o conjunto de trilhas, incluindo desvio padrão.

Para a média espacial foram usados os dois lados de cada par de trilhas observados na mesma época, por exemplo, GT2R e GT2L observados em 29/04/2021 foram reduzidos a uma trilha média. A média temporal foi calculada a partir das médias espaciais, resultando em uma única trilha para cada conjunto de trilhas. Cabe ressaltar que as médias temporais foram calculadas levando em conta a época de passagem do satélite pela região das estações linimétricas/linigráficas, sendo classificadas como completa e pareada. Nas médias temporais completas foram usadas todas as trilhas para cada par de estações linimétricas/linigráficas, independente se uma estação tenha uma trilha que não há em outra. Nas médias temporais pareadas, são usadas apenas as trilhas que passam, na mesma época, na região das duas estações linimétricas/linigráficas.

Os desníveis entre as estações linimétricas/linigráficas e suas incertezas foram determinados a partir das diferenças de altitude ortométrica entre os pontos sobre as trilhas do satélite lidar altímetro ajustadas mais próximos. Foram usadas quatro abordagens denominadas tipo-1, tipo-2, tipo-3 e tipo-4

Na abordagem tipo-1, o desnível sobre a superfície da água usa cada trilha individualmente, ajustada, e que passam pelos dois pontos de interesse na mesma época. Como o sensor ATLAS mede três pares de trilhas por faixa, os dois pontos na qual se está determinando o desnível não precisam estar na mesma trilha, desde que sejam medidas efetuadas na mesma época. A figura 60 mostra o perfil esquemático na determinação do desnível pela abordagem tipo-1, empregando a equação 108 onde  $H^{W(t)}$  são as altitudes ortométricas determinadas a partir do sensor altímetro orbital e modelo geoidal.

Figura 60 – Perfil do nivelamento hidrográfico orbital tipo-1.



Fonte: Elaboração própria.

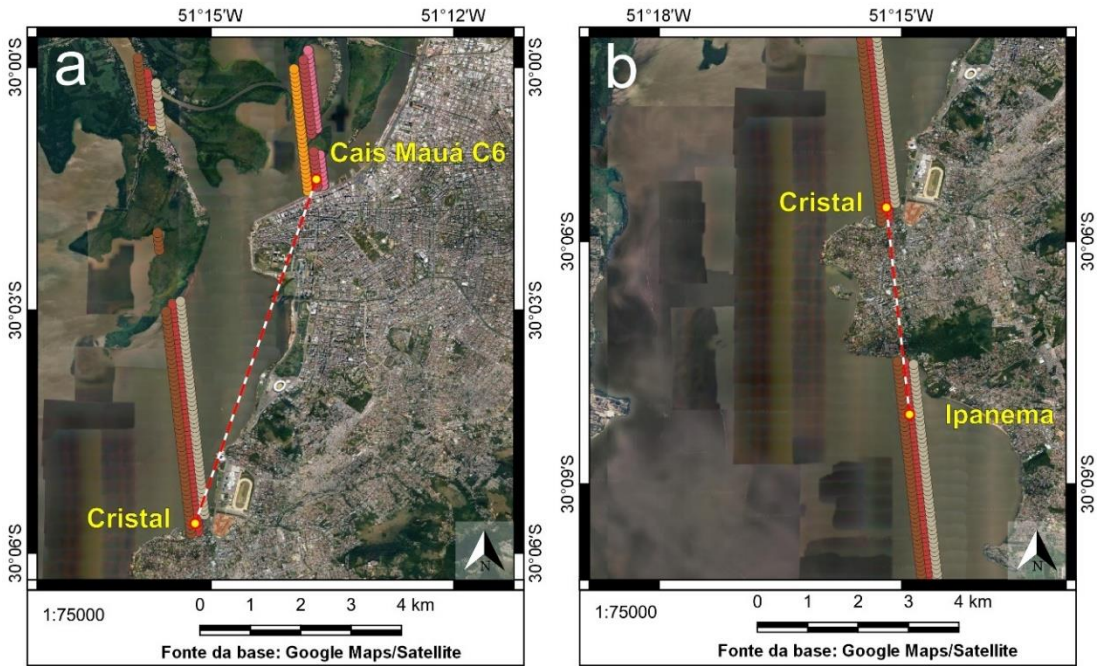
$$\Delta H_{ij}^{W(t)} = H_j^{W(t)} - H_i^{W(t)} \quad (107)$$

Na abordagem tipo-2, são usadas as médias espaciais dos dois lados de cada par de trilhas e o processo de determinação do desnível é o mesmo da abordagem tipo-1, ilustrado pela figura 60 e calculado a partir da equação 108.

A abordagem tipo-3 usa a média temporal, que reduz as trilhas a uma para cada conjunto de trilhas. A média temporal, como já explicado anteriormente, pode ser completa ou pareada. A média temporal completa usa todas as trilhas que passam em cada ponto, independentemente de estar presente em um ponto e ausente em outro. Na média temporal pareada, as trilhas têm que estar presentes nos dois pontos. O processo de determinação do desnível é o mesmo das abordagens tipo-1 e tipo-2 (figura 60 e equação 108). A figura 61 mostra as linhas que unem dois pontos sobre trilhas diferentes (exemplo entre Cais Mauá C6 e Cristal – figura 61a) e sobre a mesma trilha (exemplo entre Cristal e Ipanema – figura 61b).



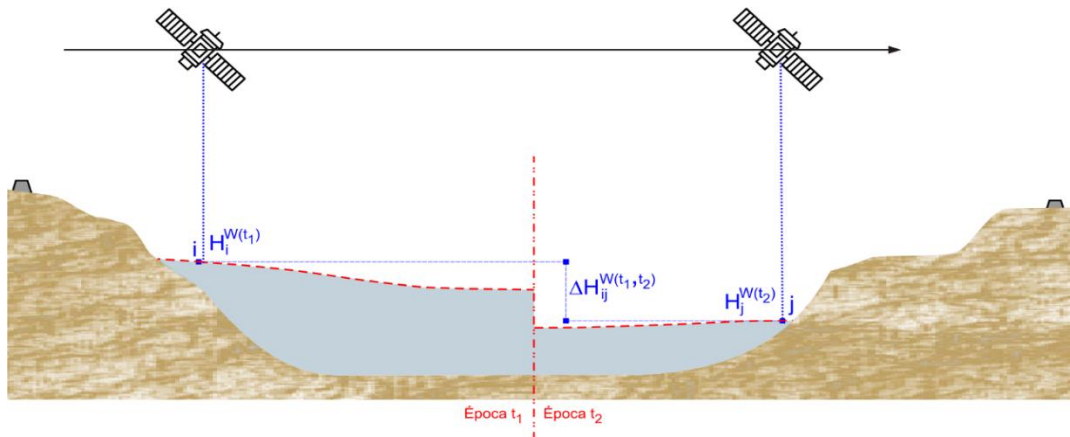
Figura 61 – Exemplo de desníveis entre conjuntos de trilhas diferentes (a) e mesmo conjunto de trilhas (b), desde que pareadas (mesma época).



Fonte: Elaboração própria.

Enquanto nas abordagens tipo-1, tipo-2 e tipo-3 as observações orbitais tem que ser aproximadamente simultâneas (mesma época/pareadas) para cada par de pontos, na abordagem tipo-4 são utilizadas observações em duas épocas distintas para cada ponto, denominadas  $t_1$  e  $t_2$ . Assim, além do desnível espacial, também surge um desnível temporal como mostra a figura 62, que é calculado a partir da equação 109.

Figura 62 – Perfil do nivelamento hidrográfico orbital tipo-4.



Fonte: Elaboração própria.

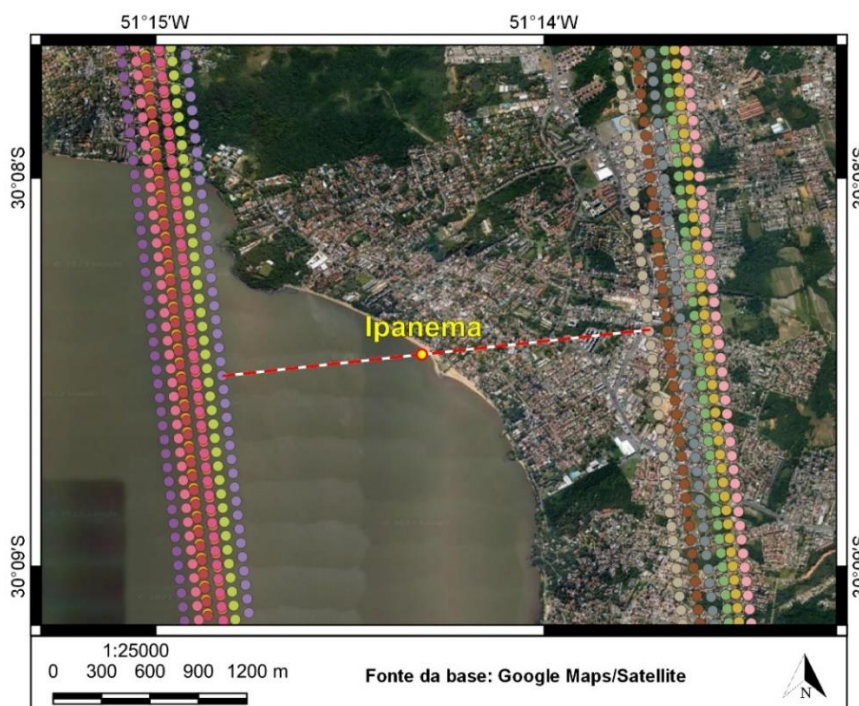
$$\Delta H_{ij}^{W(t_1, t_2)} = H_j^{W(t_2)} - H_i^{W(t_1)} \quad (109)$$

Como a distância entre pares de trilhas em cada faixa ICESat-2 é de aproximadamente 3 km, nenhum ponto ficará mais que aproximadamente 1,5 km de uma trilha. Porém, caso ocorra este tipo de situação, é possível efetuar uma interpolação linear simples dos valores dos pontos entre duas trilhas adjacentes como mostra a figura 63 para o caso da estação linimétrica/linigráfica de Ipanema. A solução é dada pela equação 110.

$$H_L^{W(t)} = \frac{(H_{tr_2}^{W(t)} - H_{tr_1}^{W(t)}) \cdot \Delta D_{L-tr_2}^h}{\Delta D_{tr_1-tr_2}^h} + H_{tr_2}^{W(t)} \quad (110)$$

Na equação 110,  $H_L^{W(t)}$  é a altitude ortométrica interpolada no linímetro/linígrafo,  $H_{tr_1}^{W(t)}$  e  $H_{tr_2}^{W(t)}$  são as altitudes ortométricas na primeira e segunda trilha respectivamente,  $\Delta D_{L-tr_2}^h$  é a distância entre o linímetro e a segunda trilha e  $\Delta D_{tr_1-tr_2}^h$  é a distância entre a primeira e segunda trilhas.

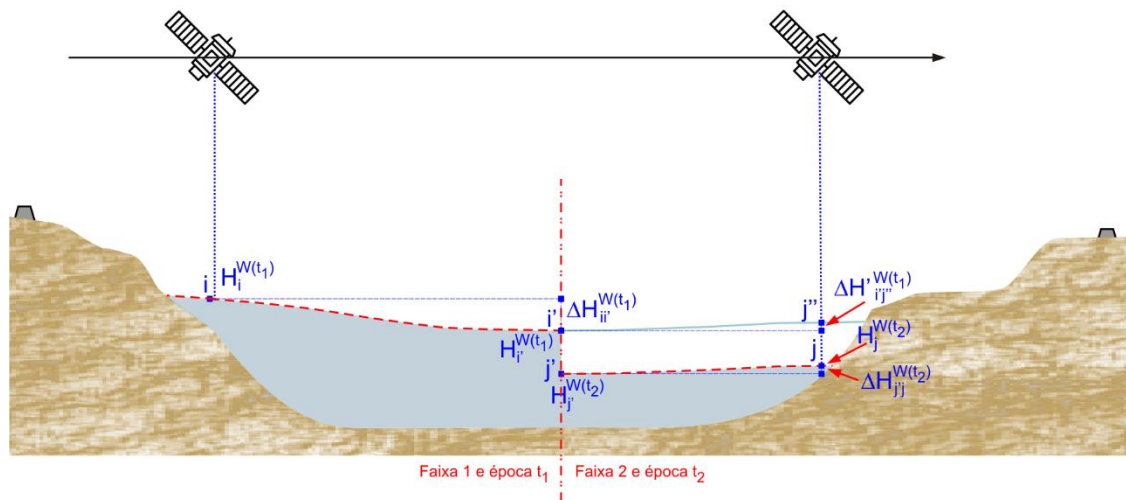
Figura 63 – Exemplo de interpolação de valores entre trilhas adjacentes na estação de Ipanema, que devem ser da mesma época. As cores indicam cada passagem do satélite em cada época.



Fonte: Elaboração própria.

Outra situação que pode ocorrer é quando não há trilhas, para dois pontos, na mesma época ou em faixas diferentes. Uma solução é usar a abordagem tipo-4, outra solução seria usar uma região de cruzamento entre trilhas de faixas diferentes. Neste caso, para a primeira faixa, usa-se as abordagens tipo-1, tipo-2 ou tipo-3 para determinar o desnível do ponto de origem até o ponto de cruzamento entre faixas/trilhas em uma época  $t_1$ . Para a segunda faixa realiza-se o mesmo processo desde o ponto de cruzamento até o ponto de chegada sobre a segunda faixa em uma época  $t_2$ . O uso desta abordagem deve pressupor que, embora haja a variação do nível da superfície da água (absoluta) não haja variação significativa no desnível (relativa) entre as épocas  $t_1$  e  $t_2$ . A figura 64 mostra o desenho esquemático deste tipo de abordagem e a figura 65 mostra sua aplicação no cálculo do desnível entre as estações linimétricas/linigráficas Cristal e Terminal CatSul Guaíba. O cálculo do desnível é efetuado usando a equação 111.

Figura 64 – Perfil mostrando o desnível entre faixas e trilhas de épocas distintas em ponto de cruzamento.



Fonte: Elaboração própria.

$$\Delta H_{ij''}^{W(t_1)} = \Delta H_{ij''}^{W(t_1)} + \Delta H_{ij''}^{W(t_1)} \quad (111)$$

Onde:

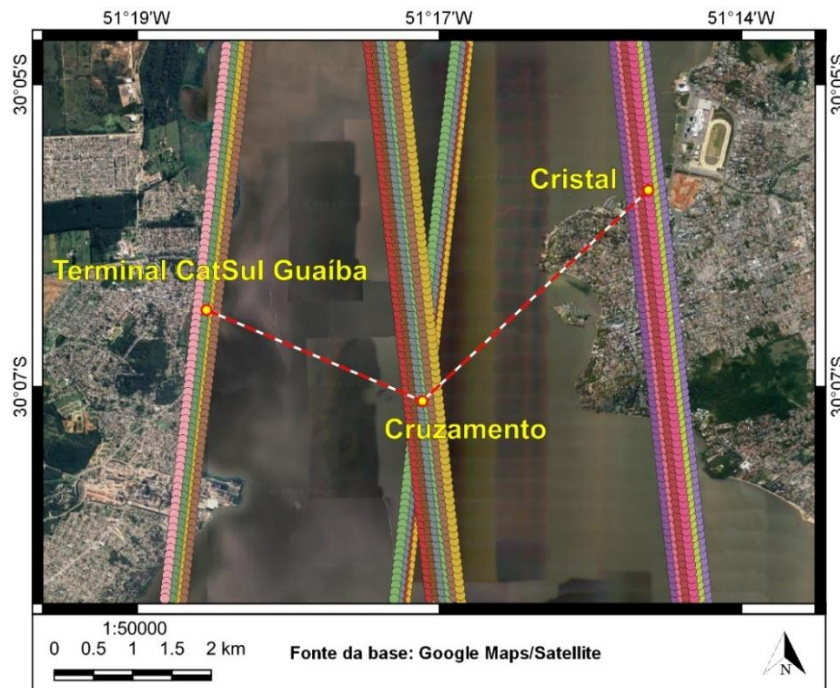


$$\Delta H_{ij}^{W(t_1)} = H_i^{W(t_1)} - H_j^{W(t_1)} \tag{112}$$

$$\Delta H_{ij}^{W(t_1)} \cong \Delta H_{jj}^{W(t_2)} = H_j^{W(t_2)} - H_j^{W(t_2)} \tag{113}$$

Na equação 113,  $\Delta H_{ij}^{W(t_1)}$  é a projeção do desnível  $\Delta H_{jj}^{W(t_2)}$  para a época  $t_1$ .

Figura 65 – Exemplo de conexão com cruzamento entre faixas e trilhas em épocas diferentes. As cores indicam cada passagem do satélite em cada época.



Fonte: Elaboração própria.

Nos quadros a seguir são mostradas as estações linimétricas/linigráficas, faixa, conjunto, trilhas e época de passagem do ICESat-2 na estação Cais Mauá C6 (Quadro 09), Cristal (Quadro 10), Ipanema (Quadro 11) e Terminal CatSul Guaíba (Quadro 12).

Quadro 09 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Cais Mauá C6.

Faixa	Conjunto	Trilhas	Época
551	Conjunto-4	GT1L/GT1R	31/01/2020
		GT2L/GT2R	31/07/2020
		GT3L/GT3R	29/04/2021
		GT3L/GT3R	29/07/2021

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 10 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Cristal.

<b>Faixa</b>	<b>Conjunto</b>	<b>Trilhas</b>	<b>Época</b>
551	Conjunto-3	GT1L/GT1R	31/07/2020
		GT3L/GT3R	30/10/2020
		GT2L/GT2R	29/04/2021
		GT2L/GT2R	29/07/2021
757	Conjunto-3	GT2L/GT2R	17/11/2018
		GT3L/GT3R	16/02/2019
		GT2L/GT2R	17/05/2019
		GT3L/GT3R	12/11/2020
		GT2L/GT2R	12/08/2021
		GT2L/GT2R	09/02/2021

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 11 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Ipanema.

<b>Faixa</b>	<b>Conjunto</b>	<b>Trilhas</b>	<b>Época</b>
551	Conjunto-3	GT1L/GT1R	31/07/2020
		GT3L/GT3R	30/10/2020
		GT2L/GT2R	29/04/2021
		GT2L/GT2R	29/07/2021
	Conjunto-4	GT2L/GT2R	31/07/2020
		GT3L/GT3R	29/04/2021
		GT3L/GT3R	29/07/2021

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 12 – Época e trilhas ICESat-2 na estação Terminal CatSul Guaíba.

<b>Faixa</b>	<b>Conjunto</b>	<b>Trilhas</b>	<b>Época</b>
757	Conjunto-1	GT2L/GT2R	14/02/2020
		GT1L/GT1R	11/02/2021

Fonte: Elaboração própria.

No quadro 13 estão as trilhas na estação de transição entre a faixa 551 e 757.

Quadro 13 – Época e trilhas ICESat-2 na transição entre as faixas 551 e 757.

<b>Faixa</b>	<b>Conjunto</b>	<b>Trilhas</b>	<b>Época</b>
551	Conjunto-2	GT3L/GT3R	01/05/2020
		GT2L/GT2R	30/10/2020
		GT1L/GT1R	29/04/2021
		GT1L/GT1R	29/07/2021

Faixa	Conjunto	Trilhas	Época
757	Conjunto-2	GT3L/GT3R	17/11/2018
		GT3L/GT3R	17/05/2019
		GT1L/GT1R	14/02/2020
		GT3L/GT3R	12/08/2021
		GT3L/GT3R	09/02/2020

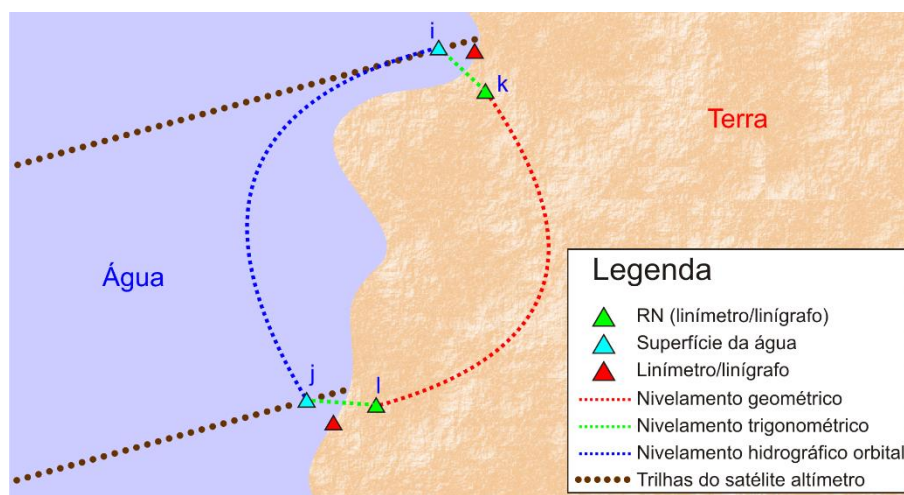
Fonte: Elaboração própria.

Uma vez determinados os desníveis sobre a superfície da água, foi realizada a avaliação do método de nivelamento hidrográfico orbital (conexão água-água) comparando-o com o método de nivelamento geométrico (conexão terra-terra) entre as RRNN dos linímetros/linígrafos, usando o método do nivelamento trigonométrico (conexão terra-água/água-terra) para conectar o nivelamento hidrográfico orbital ao nivelamento geométrico, estabelecendo desta forma, o nivelamento híbrido completo para a integração entre referenciais verticais.

### 3.3.4 Avaliação do nivelamento hidrográfico orbital

A qualidade e aplicabilidade do nivelamento hidrográfico orbital foi avaliada comparando os resultados alcançados, para cada par de estações linimétricas/linigráficas, com os resultados alcançados a partir dos métodos terrestres de nivelamento para os mesmos pontos, como mostra a figura 66.

Figura 66 – Circuito de nivelamento híbrido completo para a avaliação dos resultados do nivelamento hidrográfico orbital.



Fonte: Elaboração própria.

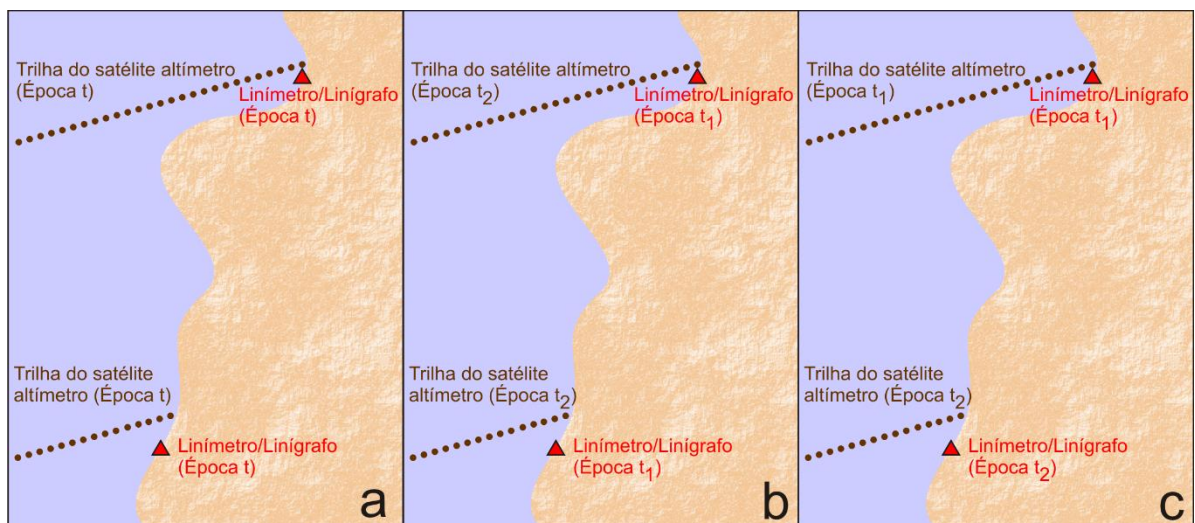
As conexões entre o nivelamento hidrográfico orbital e o nivelamento trigonométrico foram estabelecidas a partir das abordagens tipo-1, tipo-2, tipo-3 e tipo-4, comentadas anteriormente.

Na abordagem tipo-1 e tipo-2, na qual há a passagem do satélite altímetro por dois pontos em uma mesma época, foram utilizadas as leituras dos linímetros/linígrafos nas mesmas épocas de passagem do satélite, estabelecendo o desnível entre as RRNN dos linímetros/linígrafos e a superfície da água.

Nas abordagens tipo-2 e tipo-3, que também consideram a passagem do satélite por dois pontos na mesma época, foi usada a hipótese de que, embora haja a variação natural do nível da superfície do Lago Guaíba, as variações da inclinação desta superfície sejam suficientemente pequenas (ao nível do centímetro) para serem consideradas viáveis. Neste caso, foram utilizadas as leituras dos linímetros/linígrafos e os resultados dos levantamentos do nível da superfície da água com o dispositivo flutuador em épocas distintas da época de passagem do satélite, porém, simultâneas nos dois pontos (mesma época para os linímetros/linígrafos).

Pela abordagem tipo-4, a leitura em cada linímetro/linígrafo do par de pontos foram da mesma época de passagem do satélite, no entanto, cada ponto do par é de uma época distinta. A figura 67 apresenta as conexões para cada tipo de abordagem.

Figura 67 – Conexões terra-água/água-terra para as abordagens tipo-1 e tipo-2 (a), tipo-2 e tipo-3 (b) e tipo-4 (c) do nivelamento hidrográfico orbital.



Fonte: Elaboração própria.

As incertezas dos valores alcançados nos métodos terrestre e hidrográfico orbital foram obtidas a partir da lei de propagação de erros, em termos de erro padrão. A discrepância entre métodos é dada pela equação 114.

$$\nabla\Delta H_{kl} = \Delta H_{kl}^{RN} - \Delta H_{ij}^W + \Delta H_{ki}^{RN'} + \Delta H_{jl}^{RN'} \quad (114)$$

Onde  $\nabla\Delta H_{kl}$  é a discrepância entre os métodos terrestre e hidrográfico orbital,  $\Delta H_{kl}^{RN}$  é o desnível a partir do nivelamento geométrico,  $\Delta H_{ij}^W$  é o desnível a partir do nivelamento hidrográfico orbital,  $\Delta H_{ki}^{RN'}$  e  $\Delta H_{jl}^{RN'}$  são os desníveis a partir do nivelamento trigonométrico e observações do linímetro/linígrafo.

A aplicabilidade do método foi analisada a partir da comparação entre as discrepâncias em relação às distâncias niveladas e os critérios estabelecidos nas normas brasileiras vigentes NBR13.133 e especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro.



#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na conexão terra-terra a partir do nivelamento geométrico, após o cálculo dos desníveis a ajustamento pelo MMQ (correlatos), foi aplicado o teste chi-quadrado, usando as distâncias como peso. Três ajustamentos foram rejeitados: RN2101Z-P4 (Guaíba), M03-P1 e P2-P3 (Cristal). Entre P2-RN4 e P1-P2 (Cristal) e RN742A-RN1 (Ipanema) os ajustamentos foram aceitos. Desta forma, foi alterado o critério de pesos para os ajustamentos rejeitados. Ao invés de usar as distâncias, foi utilizada a precisão nominal relativa do nível, de 1,5 mm/km para leituras digitais, que foi multiplicada por cada distância. Com este critério, os nivelamentos não foram rejeitados. Os quadros 14 e 15 mostram as linhas de nivelamento, os locais, critério de peso, graus de liberdade, valores superiores e inferiores de chi-quadrado teórico ( $\chi^2_{GL;\alpha/2}$  e  $\chi^2_{GL;1-\alpha/2}$ ) para um nível de confiança de 95% (significância de 5%), os valores calculados de chi-quadrado calculados ( $\chi^2_{calc}$ ) e o resultado (rejeitado ou aceito).

Quadro 14 – Resultados do teste chi-quadrado antes da mudança de critério de pesos para os ajustamentos rejeitados.

Linha	Local	Critério	GL	$\chi^2_{GL;\alpha/2}$	$\chi^2_{GL;1-\alpha/2}$	$\chi^2_{calc}$	Resultado
M03-P1	Cristal	Distância	66	90,333	45,448	123,210	Rejeitado
P1-P2	Cristal	Distância	1	5,024	0,001	0,566	Aceito
P2-P3	Cristal	Distância	8	17,535	2,180	18,943	Rejeitado
P2-RN4	Cristal	Distância	6	14,449	1,237	2,156	Aceito
RN742A-RN1	Ipanema	Distância	8	17,535	2,180	2,930	Aceito
RN2101Z-P4	Guaíba	Distância	34	51,958	19,813	67,406	Rejeitado

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 15 – Resultados do teste chi-quadrado após a mudança de critério de pesos para os ajustamentos rejeitados.

Linha	Local	Critério	GL	$\chi^2_{GL;\alpha/2}$	$\chi^2_{GL;1-\alpha/2}$	$\chi^2_{calc}$	Resultado
M03-P1	Cristal	Precisão	66	90,333	45,448	82,140	Aceito

Linha	Local	Critério	GL	$\chi^2_{GL;\alpha/2}$	$\chi^2_{GL;1-\alpha/2}$	$\chi^2_{calc}$	Resultado
P1-P2	Cristal	Distância	1	5,024	0,001	0,566	Aceito
P2-P3	Cristal	Precisão	8	17,535	2,180	12,628	Aceito
P2-RN4	Cristal	Distância	6	14,449	1,237	2,156	Aceito
RN742A-RN1	Ipanema	Distância	8	17,535	2,180	2,930	Aceito
RN2101Z-P4	Guaíba	Precisão	34	51,958	19,813	44,937	Aceito

Fonte: Elaboração própria.

No quadro 16 são mostradas as linhas de nivelamento, os locais, desníveis ajustados por compensação do erro de fechamento entre nivelamento e contranivelamento, proporcional às distâncias ( $\Delta H^D$ ), desníveis ajustados e desvios padrão pelo método dos correlatos ( $\Delta H^C$  e  $\sigma^C$ ) e desníveis ajustados e desvios padrão pelo método paramétrico ( $\Delta H^P$  e  $\sigma^P$ ).

Quadro 16 – Resultados dos nivelamentos geométricos.

Linha	Local	$\Delta H^D$ (m)	$\Delta H^C$ (m)	$\sigma^C$ m	$\Delta H^P$ (m)	$\sigma^P$ (m)
M03-P1	Cristal	3,2395	3,2393	0,0017	3,2393	0,0015
P1-P2	Cristal	-6,5362	-6,5362	0,0001	-6,5362	0,0002
P2-P3	Cristal	-0,3471	-0,3474	0,0009	-0,3474	0,0007
P2-RN4	Cristal	-1,3730	-1,3731	0,0001	-1,3731	0,0002
RN742A-RN1	Ipanema	-0,1121	-0,1121	0,0002	-0,1121	0,0003
RN2101Z-P4	Guaíba	-40,8520	-40,8521	0,0012	-40,8521	0,0011

Fonte: Elaboração própria.

Entre os pontos M03 e P1 em Cristal, foi medido, em forma de irradiação, o ponto P0617, que também faz parte da RRCM do município de Porto Alegre - RS. Este ponto serviu de controle de erro grosseiro no nivelamento geométrico, mas não como referência de nível, devido às suas características (pino cravado na guia da rua) e dúvidas quanto a sua estabilidade. No quadro 17 é mostrado os valores de altitude



normal-ortométrica, sobre o ponto P0617, a partir da RRCM e do nivelamento geométrico ajustado e a discrepância entre os valores.

Quadro 17 – Resultado da passagem do nivelamento geométrico pelo ponto P0617.

Ponto	Altitude normal-ortométrica (m)		Discrepância (m)
	RRCM	Nivelada/ajustada	
P0617	5,47954	5,4839	0,00436

Fonte: Elaboração própria.

Pelo resultado apresentado no quadro 17, além de não haver erros grosseiros no nivelamento geométrico, também parece não haver nenhum tipo de abalo na referência de nível.

No quadro 18 são mostrados os desníveis e desvios padrão entre as referências de nível cujos valores provêm de outras fontes como a RAAP (RN1782Z e RN2101Z), a RRCM (M03 e RN742A) e o nivelamento geométrico executado em outubro de 2018 (GP1). No quadro 19 são apresentados os resultados para a conexão terra-terra usando o método do nivelamento geométrico entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos GP1 (Cais Mauá C6), P3 (Cristal), RN1 (Ipanema) e P4 (Guaíba).

Quadro 18 – Desníveis e desvios padrão entre referências de nível de outras redes.

De	Para	Rede	Desnível (m)	$\sigma$ (m)
RN1782Z	GP1	Outubro/2018	-0,3740	0,0006
	M03	RRCM	3,9063	0,0005
	RN742A	RRCM	-0,2674	0,0088
	RN2101Z	RAAP	40,7921	0,0600
M03	RN742A	RRCM	-4,1737	0,0088
	RN2101Z	RAAP	36,8858	0,0600
RN742A	RN2101A	RAAP	41,0595	0,0606

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 19 – Desníveis entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos.

De	Para	Desnível (m)	$\sigma$ (m)
GP1	P3	0,6360	0,0021
	RN1	-0,0055	0,0088
	P4	0,3140	0,0600

De	Para	Desnível (m)	$\sigma$ (m)
P3	RN1	-0,6415	0,0090
	P4	-0,3220	0,0600
RN1	P4	0,3195	0,0606

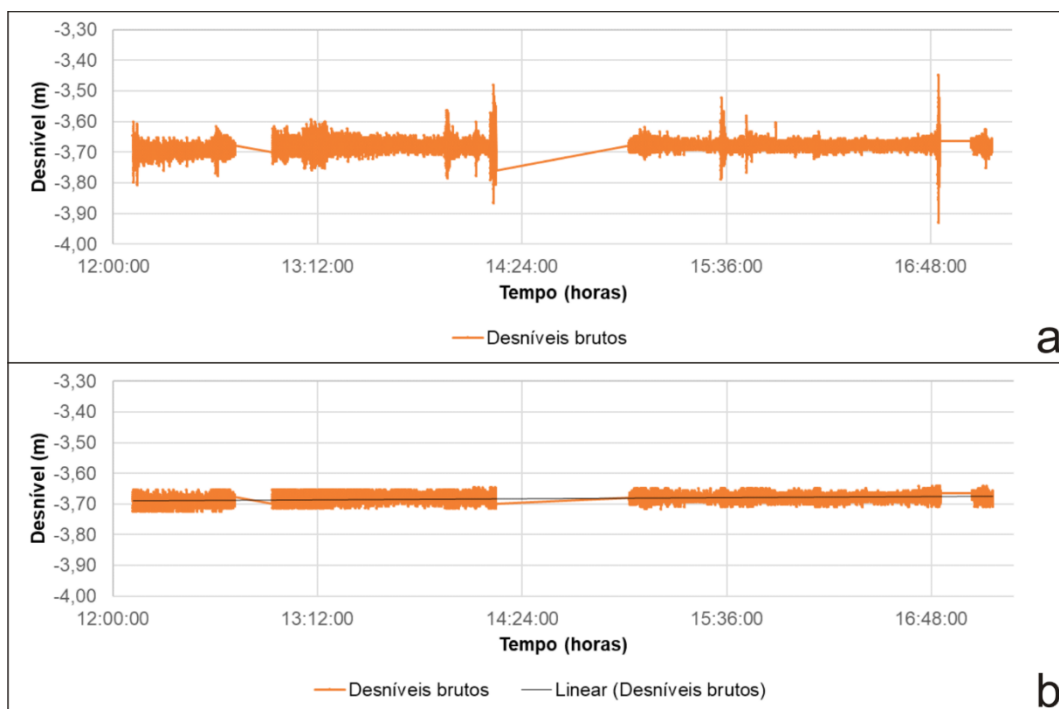
Fonte: Elaboração própria.

Na conexão terra-água, no em Cais Mauá C6, por meio do nivelamento trigonométrico em 26/10/2018, foi obtido o desnível entre o ponto GP1 e o nível da água de -2,2148 m. Fazendo a relação entre este desnível e a observação média no linígrafo durante o período de mensuração do nível da água, que foi de 1,1355 m, foi obtido o desnível entre GP1 e o “zero da régua” ( $\Delta H_{GP1-NA_0}^{RN}$ ), de -3,3503 m, lembrando que nesta campanha de levantamento não foi usado o dispositivo flutuador. Também foram medidas as tendências de aumento ou diminuição do nível da água, aferindo-se os valores de 0,0145 m e 0,0160 m para o nivelamento trigonométrico e observações do linígrafo respectivamente. A diferença entre as tendências foi de -0,0015 m, comprovando a compatibilidade entre os métodos. A figura 68 mostra os gráficos do nivelamento trigonométrico antes (68a) e após (68b) a análise de outliers, incluindo a linha de tendência gerada a partir de ajustamento linear das observações.

No levantamento de 20/04/2023, o desnível entre GP1 e o nível da água foi de -2,0438 m e o desnível entre GP1 e o “zero da régua” de -3,0313 m. A tendência de subida do nível da água foi calculada em 0,0235 m a partir do nivelamento trigonométrico e de 0,0400 m a partir das observações do linígrafo. A diferença de 0,0165 m pode ter sido causada pela influência da vegetação no período das tomadas de medida do nível da água, com as folhas e caules invadindo a linha de visada ao dispositivo flutuador em alguns períodos, porém, devido à pequena quantidade de vegetação em relação ao volume de água existente, é pouco provável que haja a variação do nível da água devido a sua presença. A figura 69 mostra os gráficos do levantamento realizado em 20/04/2023.

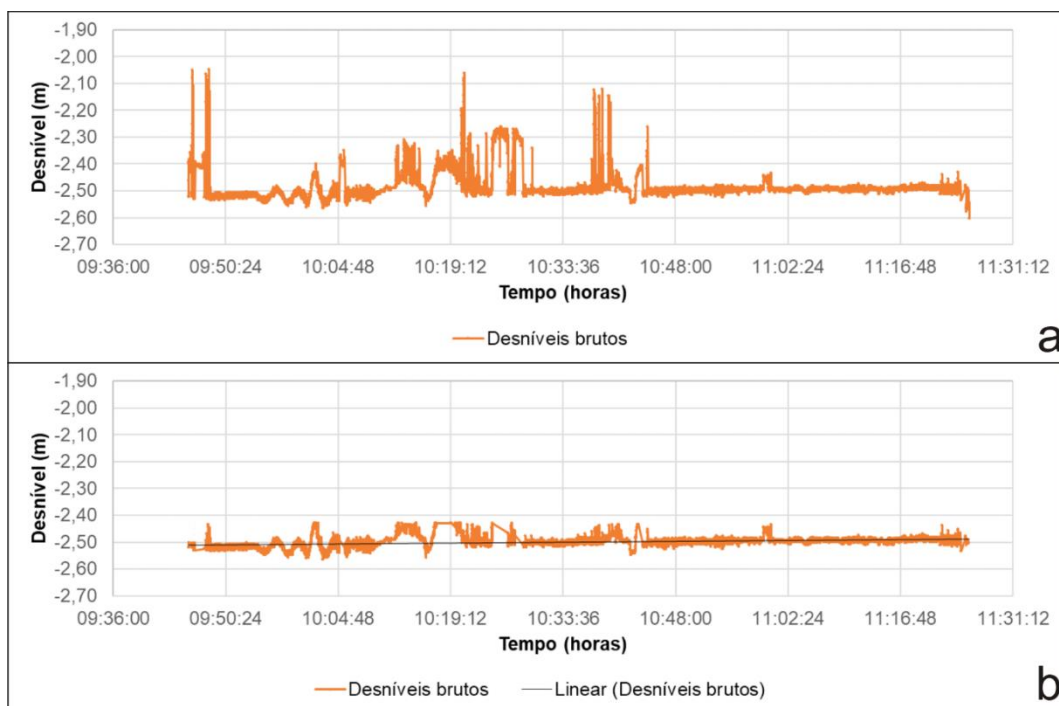
A diferença de 0,3190 m no “zero da régua” entre 20/10/2018 e 20/04/2023 pode estar ligada à alguma manutenção feita no linígrafo no período, onde o ponto de referência das medidas do nível da água fica sujeito a alterações, ou a penetração do sinal da estação total na água, já que em 20/10/2018 não foi usado o dispositivo flutuador.

Figura 68 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 26/10/2018.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 69 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 20/04/2023.



Fonte: Elaboração própria.

O quadro 20 mostra os desníveis entre GP1 e o nível da água ( $\Delta H_{GP1-NA}^{RN'}$ ), o valor médio das observações do linígrafo Cais Mauá C6 ( $\delta H_{NA}^L$ ), o desnível entre GP1 e o “zero do linígrafo” ( $\Delta H_{GP1-NA_0}^{RN'}$ ) e a incerteza ( $\sigma_{m\u00e9dia}$ ) em 26/10/2018 e 20/04/2023. Em Cristal, os valores do nível da água, leitura média no linímetro (régua), “zero da régua” e incertezas são apresentados no quadro 21.

Quadro 20 – Desnível entre a referência de nível do linígrafo Cais Mauá C6, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra) no SPH.

Data	$\Delta H_{GP1-NA}^{RN'} (m)$	$\delta H_{NA}^L (m)$	$\Delta H_{GP1-NA_0}^{RN'} (m)$	$\sigma_{m\u00e9dia} (m)$
26/10/2018	-2,2148	1,1355	-3,3503	0,0050
20/04/2023	-2,0438	0,9875	-3,0313	0,0030

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 21 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Cristal, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra).

Data	$\Delta H_{P3-NA}^{RN'} (m)$	$\delta H_{NA}^L (m)$	$\Delta H_{P3-NA_0}^{RN'} (m)$	$\sigma_{m\u00e9dia} (m)$
17/04/2023	-2,6058	0,8800	-3,4858	0,0005
18/04/2023	-2,8152	0,6700	-3,4852	0,0007
19/04/2023	-2,7773	0,7000	-3,4773	0,0024
09/06/2023	-3,0399	0,4400	-3,4799	0,0007

Fonte: Elaboração própria.

A partir do nivelamento trigonométrico com medida indireta de distância, diretamente sobre o linímetro, foi calculado o desnível entre a referência de nível P3 e o “zero da régua”, resultando em um valor de  $-3,4573 \pm 0,0027$  m e, pelo nivelamento trigonométrico com medida direta de distância,  $-3,441 \pm 0,0027$  m. O valor médio do “zero da régua”, a partir de todas as observações, é de  $-3,4716 \pm 0,0092$  m, com diferença de -6 mm em relação ao valor determinado, baseado nas informações disponibilizadas pela ANA/CPRM (desnível a partir da RN4, -2,440 m), cujo valor calculado é de -3,4656 m a partir de P3.

O quadro 22 mostra a discrepância entre o nível da superfície da água entre as observações médias do linímetro e os valores médios medidos por meio do nivelamento trigonométrico entre os quatro dias de levantamento.

Quadro 22 – Comparação do desnível temporal da superfície da água em Cristal entre o nivelamento trigonométrico e as observações do linímetro.

<b>De→Para (2023)</b>	<b>Nivelamento Trigonométrico (m)</b>	<b>Leituras no linímetro (m)</b>	<b>Discrepância (m)</b>
17/04→18/04	-0,2094	-0,2100	-0,0006
18/04→19/04	0,0379	0,0300	-0,0079
19/04→09/06	-0,2626	-0,2600	0,0026

Fonte: Elaboração própria.

Os valores das discrepâncias ratificam os resultados encontrados no SPH, no linígrafo Cais Mauá C6, de que o método de medidas diretas da superfície da água pelo nivelamento trigonométrico é compatível com as leituras no linímetro (régua). Também foi realizada a comparação entre as leituras no linímetro Cristal e no linígrafo Cais Mauá C6 como mostra o quadro 23.

Quadro 23 – Comparação entre as observações em Cristal e em Cais Mauá C6.

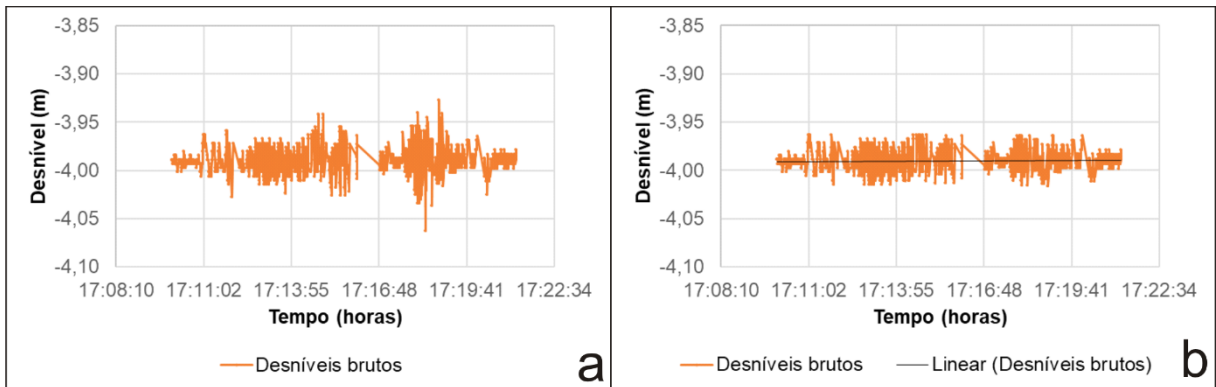
<b>Data</b>	<b>Cristal (cm)</b>	<b>Cais Mauá C6 (cm)</b>	<b>Discrepância (cm)</b>
17/04/2023	88	106	18
18/04/2023	67	82	15
19/04/2023	70	85	15
09/06/2023	44	63	19

Fonte: Elaboração própria.

A amplitude das diferenças entre as leituras em Cristal e Cais Mauá C6 foi de 4 cm, com a maior diferença de 19 cm e a menor diferença de 15 cm. Isto se deve, principalmente, ao fato de que no exato momento da leitura (as observações são simultâneas), o nível da superfície da água pode estar subindo em uma estação e baixando em outra durante o seu processo oscilatório natural.

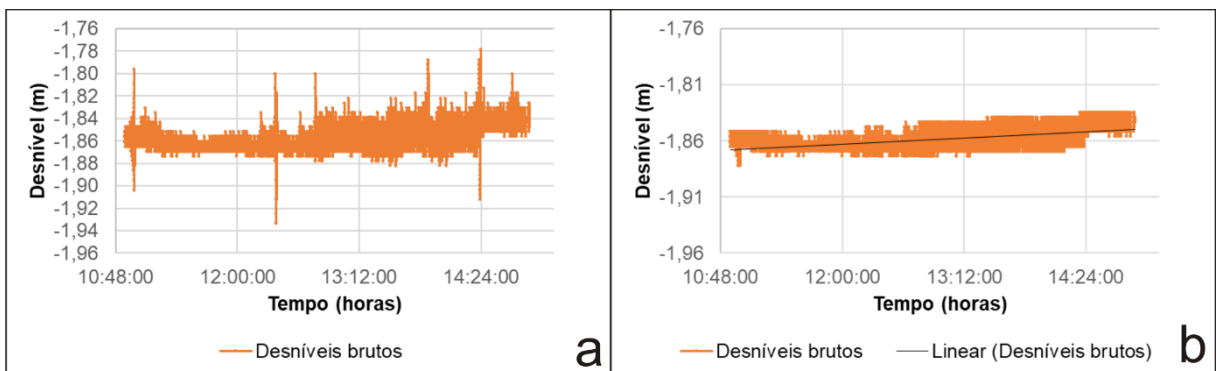
Nas figuras 70, 71, 72 e 73 são mostrados os gráficos das medidas da superfície da água em Cristal, antes e após as análises de *outliers*, para todos os dias de levantamento.

Figura 70 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 17/04/2023.



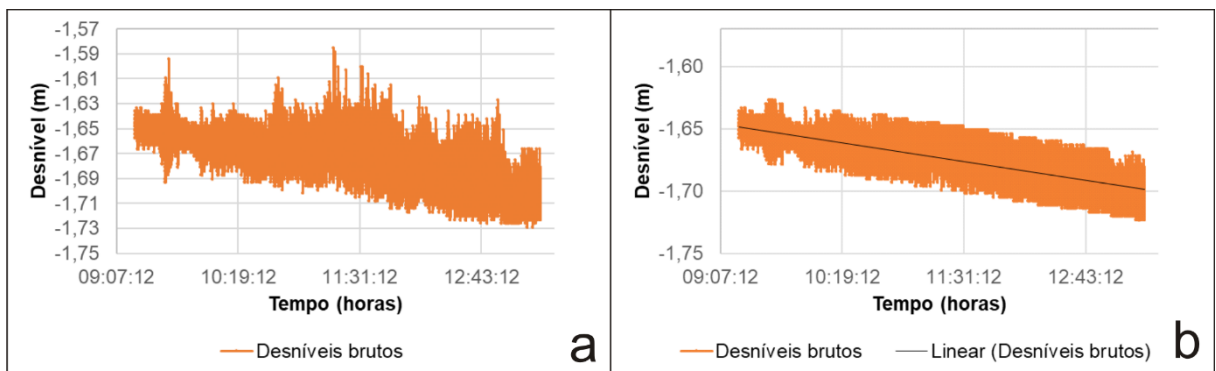
Fonte: Elaboração própria.

Figura 71 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 18/04/2023.



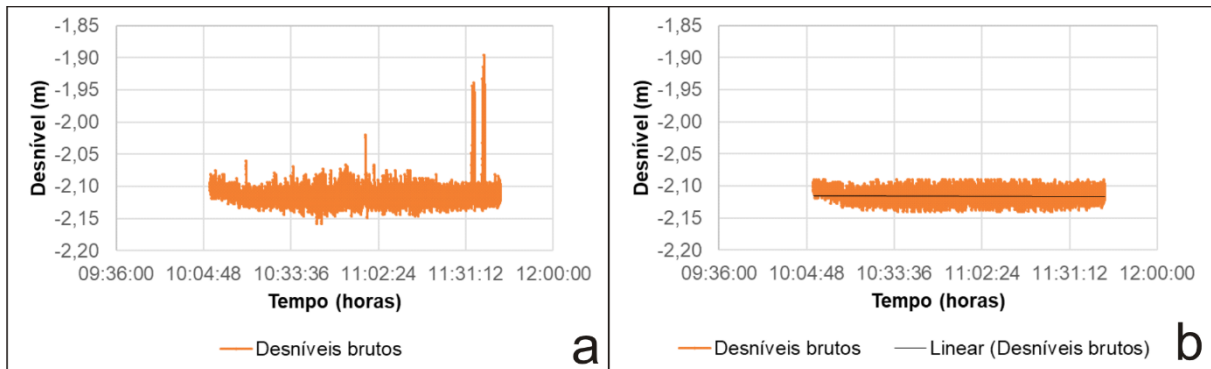
Fonte: Elaboração própria.

Figura 72 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 19/04/2023.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 73 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em 09/06/2023.



Fonte: Elaboração própria.

Na estação de Ipanema foi utilizado apenas o nivelamento trigonométrico com medida direta de distância sobre a régua linimétrica devido à bancos de areia próximo às margens que provocariam o encalhe do dispositivo flutuador, não sendo possível (por questões de logística) instalá-lo mais afastado da margem (indisponibilidade de embarcação para este fim). Os resultados para o dia 08/06/2023 (dia das observações) do desnível entre a RN1 e a superfície da água, leitura realizada na régua, “zero da régua” e incerteza são apresentados no quadro 24.

Quadro 24 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Ipanema, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra).

Data	$\Delta H_{RN1-NA}^{RN'}$ (m)	$\delta H_{NA}^L$ (m)	$\Delta H_{RN1-NA_0}^{RN'}$ (m)	$\sigma_{m\u00e9dia}$ (m)
08/06/2023	-2,3045	0,4700	-2,7745	0,00013

Fonte: Elaboração própria.

Para o linímetro em Ipanema, não há registro da RN1 na ficha da estação, de 24/03/2021, mas há valores de desnível próximo à RN, como mostra a figura 74.

Observou-se um mais antigo (2780 mm) e um mais recente (2806 mm). A discrepância entre o valor obtido a partir do nivelamento trigonométrico com medida direta de distância e o valor mais antigo é de -5,5 mm enquanto para o valor mais recente é de -3,15 cm, indício de que o valor mais antigo parece ser o correto.

Figura 74 – RN1 em Ipanema com dois registros de desnível em relação ao “zero da régua”.



Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma como foi efetuado em Cristal, foram comparadas duas leituras realizadas no linímetro de Ipanema, às 8h 32m 00s e 10h 32m 00s, com as respectivas leituras no linígrafo Cais Mauá C6 (no mesmo horário), como mostra o quadro 25.

Quadro 25 – Comparação entre as observações em Ipanema e em Cais Mauá C6.

<b>Hora</b>	<b>Ipanema (cm)</b>	<b>Cais Mauá C6 (cm)</b>	<b>Discrepância (cm)</b>
08:32:00	45	72	27
10:32:00	47	73	26

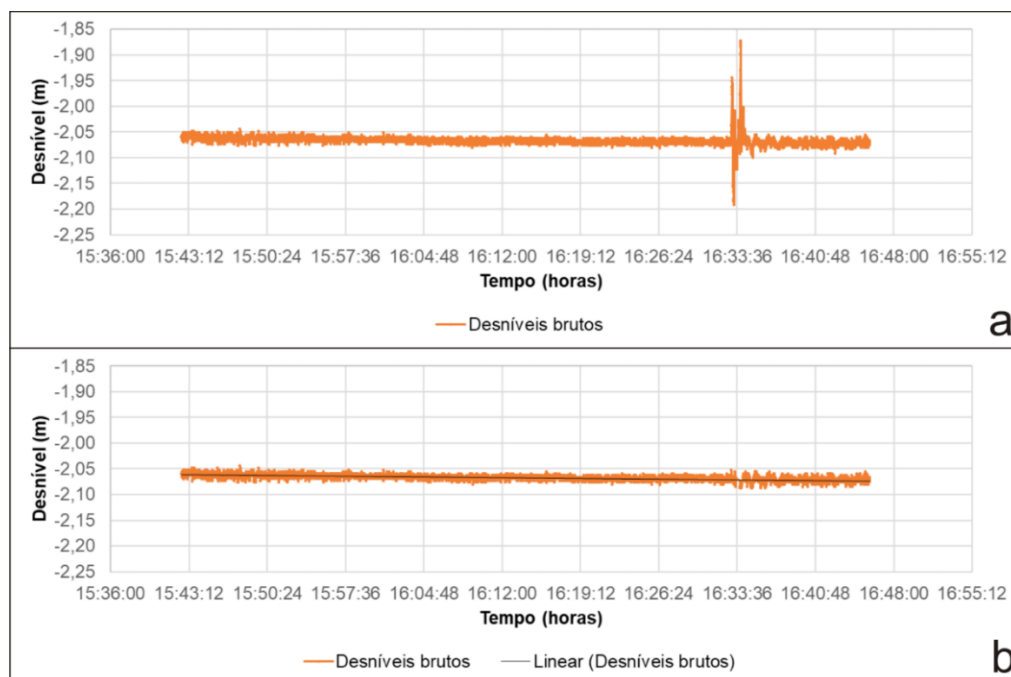
Fonte: Elaboração própria.

Há constância no desnível entre SPH e Ipanema, embora duas observações com duas horas de intervalo sejam insuficientes para uma análise precisa.

Em Guaíba foi empregado o nivelamento trigonométrico com medida direta de distância para a determinação do desnível entre o ponto P4 e a superfície da água. A figura 76 mostra os gráficos antes (75a) e depois (75b) da análise de *outliers*.



Figura 75 – Nivelamento trigonométrico para a determinação do nível da superfície da água antes (a) e depois (b) da análise de outliers em Guaíba.



Fonte: Elaboração própria.

A anomalia verificada na figura 75a, por volta das 16h 33m 36s, foi provocada pela agitação da água no momento da passagem do catamarã que faz o transporte de passageiros entre Porto Alegre e Guaíba, pois a estação linigráfica Terminal CatSul Guaíba está localizada no terminal do Catamarã. No quadro 26 são apresentados os resultados do desnível entre P4 e a superfície da água, observação média no linígrafo Terminal CatSul Guaíba, o desnível entre P4 e o “zero da régua” e a incerteza.

Quadro 26 – Desnível entre a referência de nível do linímetro Terminal CatSul Guaíba, o nível da água e o “zero da régua” (conexão terra-água/água-terra).

Data	$\Delta H_{P4-NA}^{RN'}$ (m)	$\delta H_{NA}^L$ (m)	$\Delta H_{P4-NA_0}^{RN'}$ (m)	$\sigma_{m\u00e9dia}$ (m)
08/06/2023	-3,1319	0,6683	-3,8002	0,0005

Fonte: Elaboração própria.

No quadro 27 é mostrada a comparação entre as observações nos linígrafos Terminal CatSul Guaíba e Cais Mauá C6, no período em que foi realizado o levantamento da superfície da água.

Quadro 27 – Comparação entre as observações nos linígrafos Terminal CatSul Guaíba e Cais Mauá C6.

<b>Hora</b>	<b>Terminal CatSul Guaíba (cm)</b>	<b>Cais Mauá C6 (cm)</b>	<b>Discrepância (cm)</b>
15:30:00	68	71	3
15:45:00	67	70	3
16:00:00	65	71	6
16:15:00	67	70	3
16:30:00	67	70	3
16:45:00	67	71	4

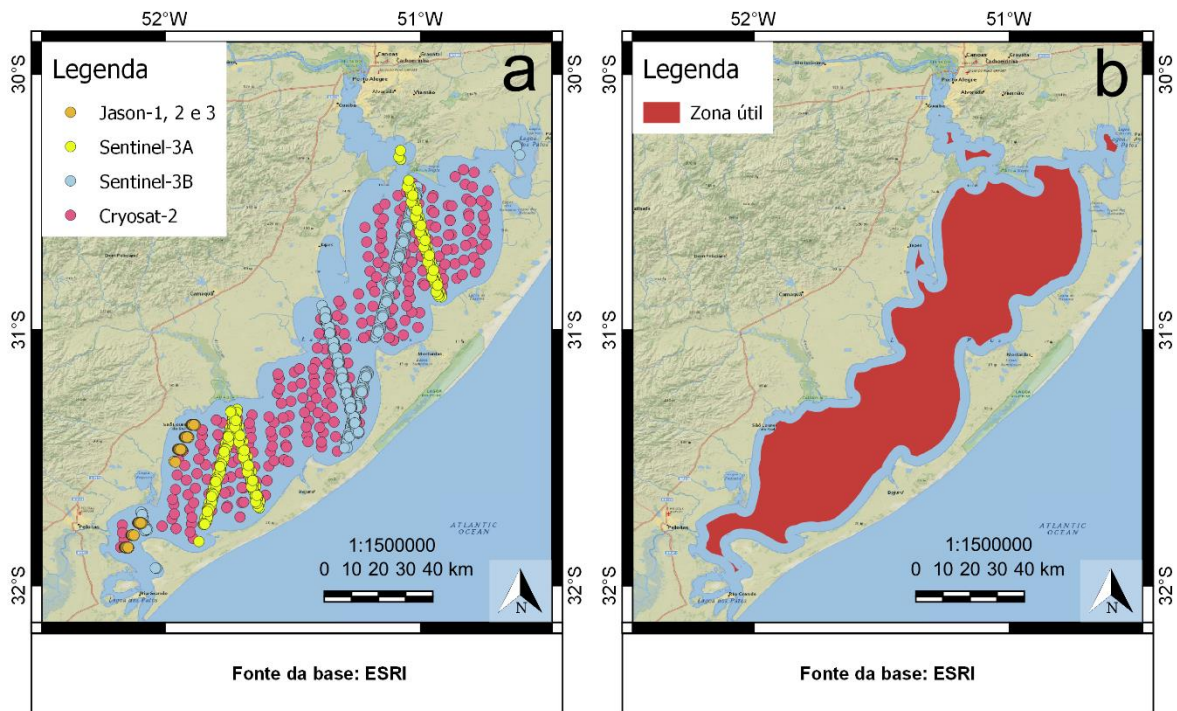
Fonte: Elaboração própria.

Também foi verificado, nesta comparação, que as discrepâncias se apresentaram aproximadamente constantes, com exceção da observação realizada as 16h, que pode ter sido causada por uma pequena movimentação local da superfície da água que existiu em Terminal CatSul Guaíba, mas não em Cais Mauá C6.

No levantamento da superfície da água pelo nivelamento trigonométrico, foi observada uma tendência de diminuição do nível da água de  $-0,0117$  m e, a partir das observações do linígrafo,  $-0,0100$  m, com uma discrepância de  $0,0017$  m. Esta discrepância fica dentro da resolução de leitura no linígrafo (1 cm) e corrobora com a hipótese de que o método de determinação do nível da superfície da água a partir do nivelamento trigonométrico e dispositivo flutuador é compatível com as observações de linímetros/linígrafos.

Os dados com frequência de 1 Hz dos satélites altímetros radar, nível de processamento L2P, são classificados como disponíveis ou não disponíveis, de acordo com a presença ou não de valores de MSS e SLA, que são necessários para a determinação das altitudes elipsoidais dos pontos nas trilhas. Nos conjuntos de dados, estes valores não são disponibilizados sobre a terra e próximo às margens do corpo hídrico, devido à contaminação da terra nos pontos medidos sobre a superfície da água. A partir dos pontos válidos (valores disponíveis) das missões Jason-1, Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A, Sentinel-3B e Cryosat-2, foi realizado o cálculo da distância média entre os primeiros e os últimos pontos válido sobre as trilhas, dentro do complexo Guaíba/Patos, até as margens. O resultado foi que, em média, a zona útil para os satélites radares altímetros com frequência de dados 1 Hz está a aproximadamente 4 km das margens, como mostra a figura 76.

Figura 76 – Pontos válidos das trilhas dos satélites radar altímetros das missões Jason, Sentinel-3 e Cryosat-2 (a) e zona útil (b).

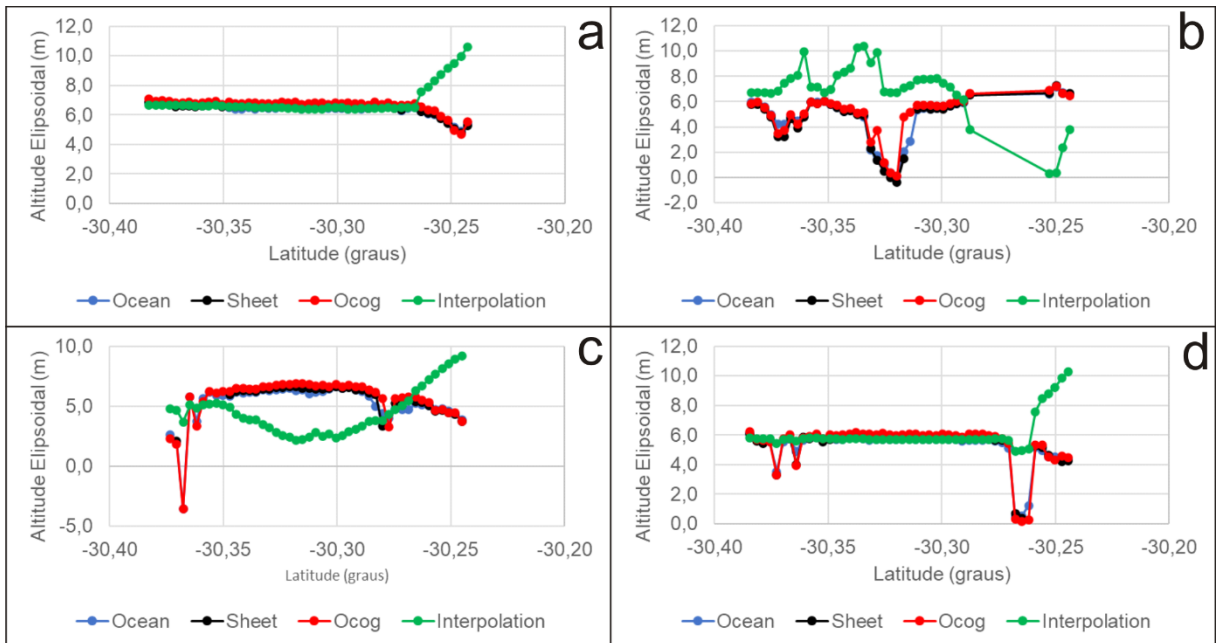


Fonte: Elaboração própria.

Como é possível perceber na figura 76, além de existir a lacuna de 4 km, praticamente não há dados válidos no Lago Guaíba, com exceção de alguns pontos na parte sul do corpo hídrico. Conseqüentemente não há dados válidos na área de estudo.

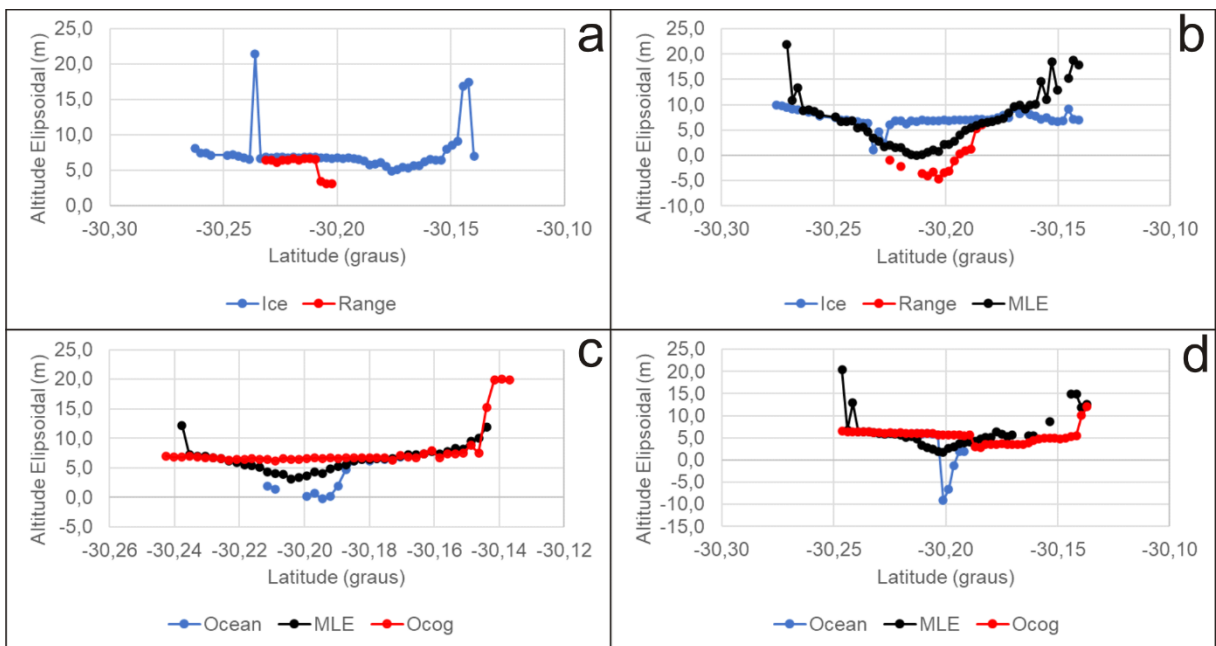
Para a frequência de dados de 20 Hz dos satélites altímetros radar, há pontos sobre o Lago Guaíba, porém como já mencionado anteriormente, a cobertura espacial é pobre para as missões Jason-1, Jason-2, Jason-3, Sentinel-3A e Sentinel-6A (Jason-CS), embora a resolução temporal seja boa. A missão Cryosat-2 tem boa cobertura espacial, porém pobre resolução temporal. O comportamento dos dados, a cada passagem sobre o Lago Guaíba, apresenta-se com uma certa heterogeneidade como mostra os gráficos para algumas trilhas na figura 77 (Sentinel-3A), figura 78 (Jason-1, Jason-2, Jason-3 e Sentinel-6A no modo LRM), figura 79 (Sentinel-6A no modo SAR) e figura 80 (Cryosat-2).

Figura 77 – Exemplos de comportamento das trilhas Sentinel-3A sobre o Lago Guaíba em 17/03/2017 (a), 26/04/2018 (b), 30/07/2017 (c) e 03/02/2020 (d).



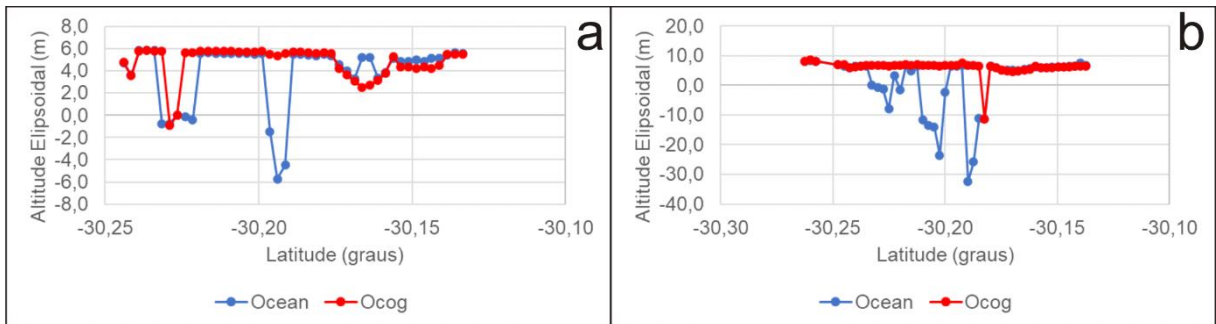
Fonte: Elaboração própria.

Figura 78 – Exemplos de comportamento das trilhas sobre o Lago Guaíba das missões Jason-1 em 03/03/2005 (a), Jason-2 em 31/07/2012 (b), Jason-3 em 05/02/2019 (c) e Sentinel-6A no modo LRM em 10/02/2022 (d).



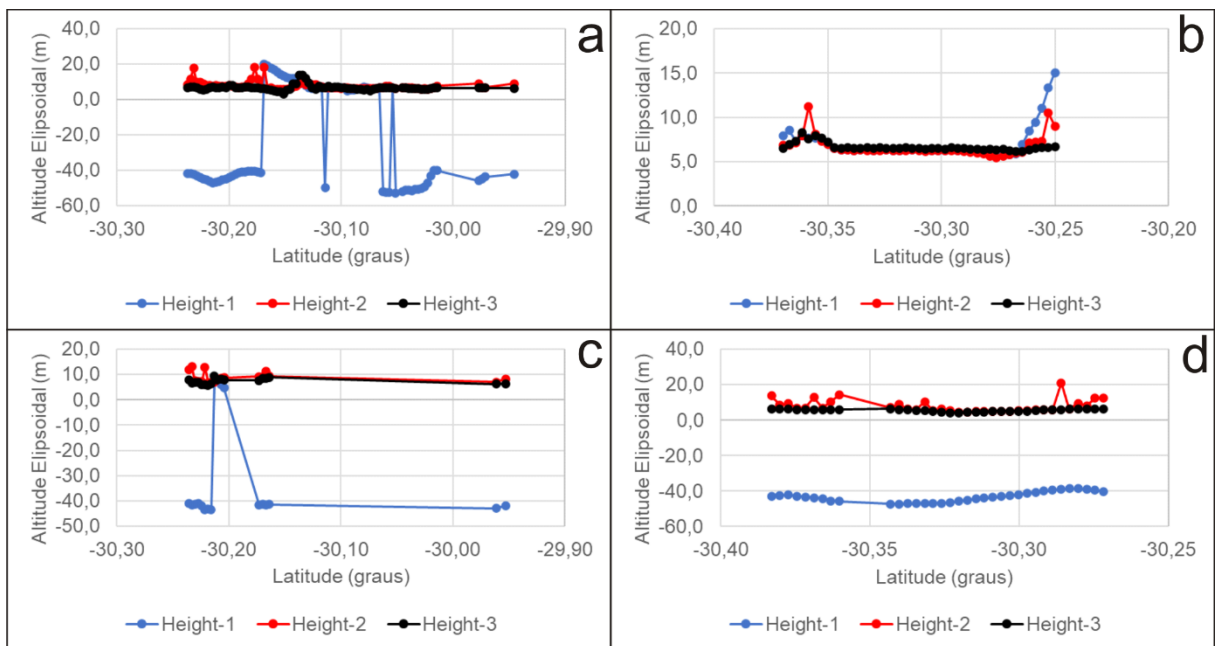
Fonte: Elaboração própria.

Figura 79 – Exemplos de comportamento das trilhas sobre o Lago Guaíba da missão Sentinel-6A no modo SAR em 31/01/2022 (a) e 18/07/2022 (b).



Fonte: Elaboração própria.

Figura 80 – Exemplos de comportamento das trilhas Cryosat-2 sobre o Lago Guaíba em 06/06/2016 (a), 14/11/2013 (b), 23/03/2019 (c) e 06/05/2015 (d).



Fonte: Elaboração própria.

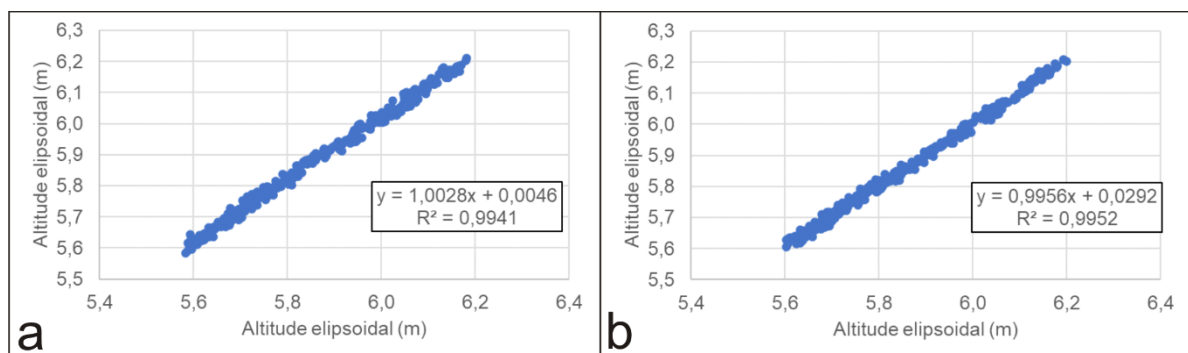
Os algoritmos Ice (Jason-1 e Jason-2), OCOG (Jason-3, Sentinel-3A e Sentinel-6A) e Height-3 (Cryosat-2) parecem ser os de melhor desempenho pois apresentam um comportamento mais linear. A heterogeneidade pode estar ligada a diversos fatores como a contaminação da terra próximo às margens, o tráfego fluvial, vegetação flutuante, ilhas, terras emersas durante períodos de estiagem dentre outros. Talvez os dados dos satélites altímetros radares possam ser usados,

aplicando filtros específicos para a seleção dos pontos das trilhas e empregando o método da validação cruzada para a geração de um modelo de topografia dinâmica da superfície da água (MDT).

Ao analisar todos os resultados, em geral, concluiu-se que os dados altimétricos radar com frequência de 1 Hz não são aplicáveis na área de estudo. Os dados com frequência de 20 Hz, embora tenham boa resolução temporal (21 dias Sentinel-3A e 10 dias para Jason-1/2/3 e Sentinel-6A), não tem boa cobertura, interceptando o Lago Guaíba em apenas dois pontos. O Cryosat-2 tem boa cobertura, mas má distribuição temporal (369 dias). Os comportamentos das trilhas sobre a superfície da água também não apresentam homogeneidade a cada passagem. Embora os dados dos satélites radares altímetros sejam perfeitamente aplicáveis aos métodos propostos, neste momento não serão usados devido à já citada pobre cobertura espacial ou temporal.

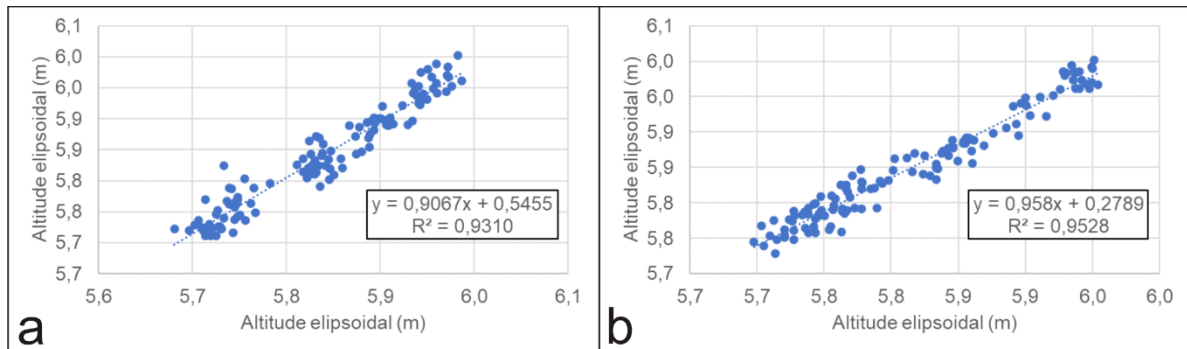
As análises dos dados do satélite altímetro lidar ICESat-2 iniciaram pela comparação entre os produtos ATL08 e ATL13. Foram tomadas 6 amostras das trilhas que interceptam o Lago Guaíba para os dois produtos: GT1R/GT1L da faixa 551 (medida em 29/04/2021), GT3R/GT3L da faixa 1199 (medida em 09/12/2021) e GT2R/GT2L da faixa 757 (medida em 14/02/2020). As figuras 81,82 e 83 mostram os gráficos de dispersão e os valores dos coeficientes de determinação para cada trilha, além da equação da linha de tendência.

Figura 81 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT1R (a) e GT1L (b) da faixa 551.



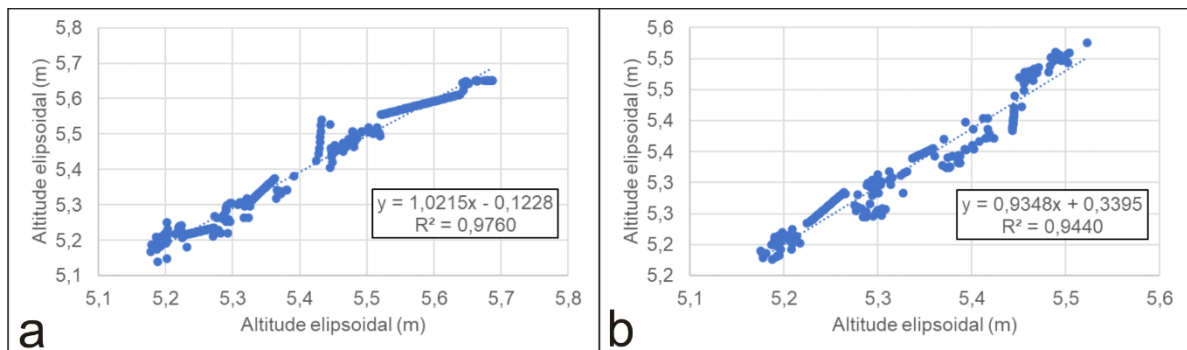
Fonte: Elaboração própria.

Figura 82 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT3R (a) e GT3L (b) da faixa 1199.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 83 – Gráficos de dispersão e coeficiente de determinação para as trilhas GT2R (a) e GT2L (b) da faixa 757.



Fonte: Elaboração própria.

Pela análise dos gráficos e dos coeficientes de correlação, transformados a partir dos valores dos coeficientes de determinação, os dois produtos são fortemente correlacionados, com valores de R acima de 0,9500 para todos os pares de amostras.

Da aplicação do teste t, ao nível de significância de 5%, obtiveram-se os resultados apresentados no quadro 28, com a identificação das trilhas, graus de liberdade (GL), os valores de t calculados e tabelados e o resultado do teste.

Quadro 28 – Elementos e resultados do teste estatístico t de student.

Faixa-Trilha	GL	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Resultado
551-GT1R	652	-1,57298	1,96361	Aceito



Faixa-Trilha	GL	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Resultado
551-GT1L	634	-0,26833	1,96371	Aceito
1199-GT3R	239	-0,08659	1,96990	Aceito
1199-GT3L	240	-3,52714	1,96994	Rejeitado
757-GT2R	471	0,46370	1,96501	Aceito
757-GT2L	361	0,81348	1,96656	Aceito

Fonte: Elaboração própria.

Das 6 amostras, 5 foram aceitas e apenas uma foi rejeitada (faixa 1199, trilha GT3L). Com os resultados alcançados pela análise preliminar pode-se afirmar que os produtos ATL08 e ATL13 são similares quanto aos dados sobre a superfície da água no Lago Guaíba, então, foi decidido utilizar o produto ATL08 para o nivelamento hidrográfico orbital.

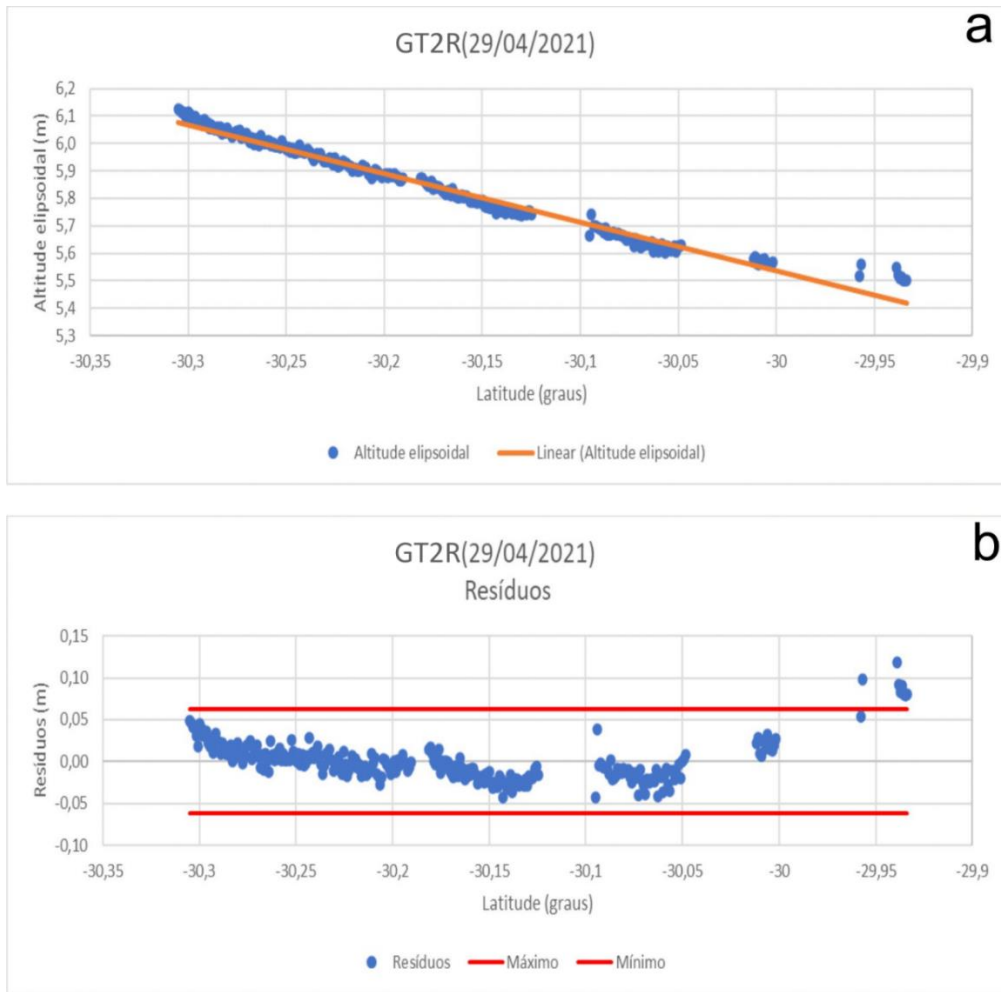
A partir das altitudes elipsoidais nas trilhas ICESat-2, produto ATL08, que interceptam o Lago Guaíba, foram realizadas inicialmente as análises de *outliers* a partir dos resíduos da regressão linear, para um nível de confiança de 99,7%. Foram usadas um total de 136 trilhas, sendo 50 trilhas para as faixas 551/993 e 86 trilhas para as faixas 757/1199. Em média, foram encontrados 3 valores de *outliers* para as trilhas 551/993, onde a trilha GT1R da faixa 551, observada em 29/04/2021, teve o maior número de *outliers*, 14 em 346 observações (4%). Nas faixas 757/1199 foram encontrados, em média, 2 *outliers*, observando-se o maior número de *outliers* na trilha GT3R da faixa 757 observada em 17/11/2018, com 9 em 277 observações (3%). Os números demonstram uma certa regularidade dos pontos das trilhas ao longo da superfície da água no Lago Guaíba. A figura 84 mostra um exemplo dos gráficos de ajuste linear (linha de tendência) para as altitudes elipsoidais e intervalo de confiança dos resíduos para a trilha GT2R (29/04/2021) da faixa 551 do ICESat-2 (Conjunto-3 de trilhas), onde valores fora do intervalo são considerados *outliers* e excluídos. O processo foi repetido para todas as trilhas passantes pela área de estudo.

Na etapa seguinte foram testados quatro ajustes para as trilhas e selecionado o melhor entre eles a partir do critério de informação de Akaike. Foram testados os ajustes para polinômios de grau 1, 2, 3 e 4.

O polinômio a ser usado no ajustamento é aquele que tem o menor valor AIC. O quadro 29 mostra um exemplo da aplicação do cálculo AIC para a trilha GT2R (29/04/2021) da faixa 551 (Conjunto-3 de trilhas).



Figura 84 – Exemplos de linha de tendência linear (a) e intervalo de confiança dos resíduos (b), onde os valores fora do intervalo são rejeitados.



Fonte: Elaboração própria.

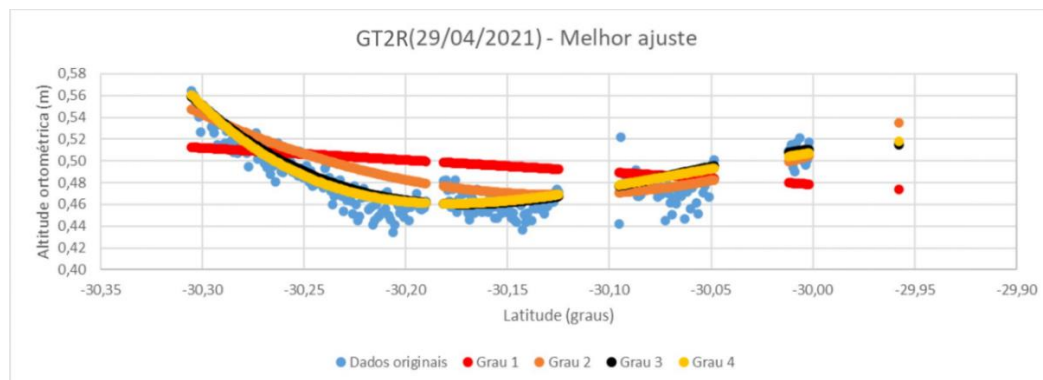
Quadro 29 – Exemplo de valores para o Critério de Informação Akaike (AIC).

Melhor Ajuste				
Grau	1	2	3	4
k	2	3	4	5
n	259			
$\sigma^2$	6,370E-04	2,180E-04	1,380E-04	1,399E-04
AIC	-1.901,90	-2.177,66	-2.294,08	-2.288,47

Fonte: Elaboração própria.

Na figura 85, para a mesma trilha de exemplo, são apresentados o gráfico com os dados originais medidos e os pontos ajustados pelos quatro graus do polinômio.

Figura 85 – Exemplo de gráfico com os dados originais e ajustados por meio de quatro graus do polinômio.

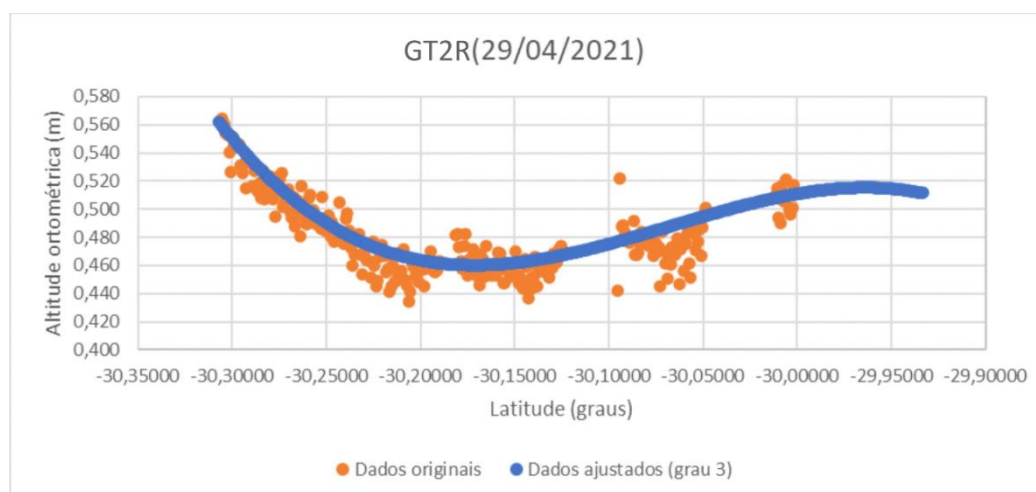


Fonte: Elaboração própria.

Neste exemplo, o melhor ajuste dos dados é para o polinômio de grau 3, que foi efetivamente utilizado para esta trilha. Este critério foi aplicado a todas as trilhas.

A figura 86 mostra o exemplo de um gráfico para uma trilha usando o melhor ajuste e os dados originais.

Figura 86 – Exemplo de gráfico de melhor ajuste sobre os dados originais.



Fonte: Elaboração própria.

O quadro 30 mostra o número e porcentagem de trilhas para cada grau do polinômio.

Quadro 30 – Número e porcentagem de trilhas ajustadas pelo grau do polinômio.

<b>Faixa</b>	<b>Grau do polinômio</b>	<b>Número de trilhas</b>	<b>Porcentagem</b>
551/993	1	7	14%
	2	6	12%
	3	12	24%
	4	25	50%
757/1199	1	14	16%
	2	14	16%
	3	25	29%
	4	33	39%

Fonte: Elaboração própria.

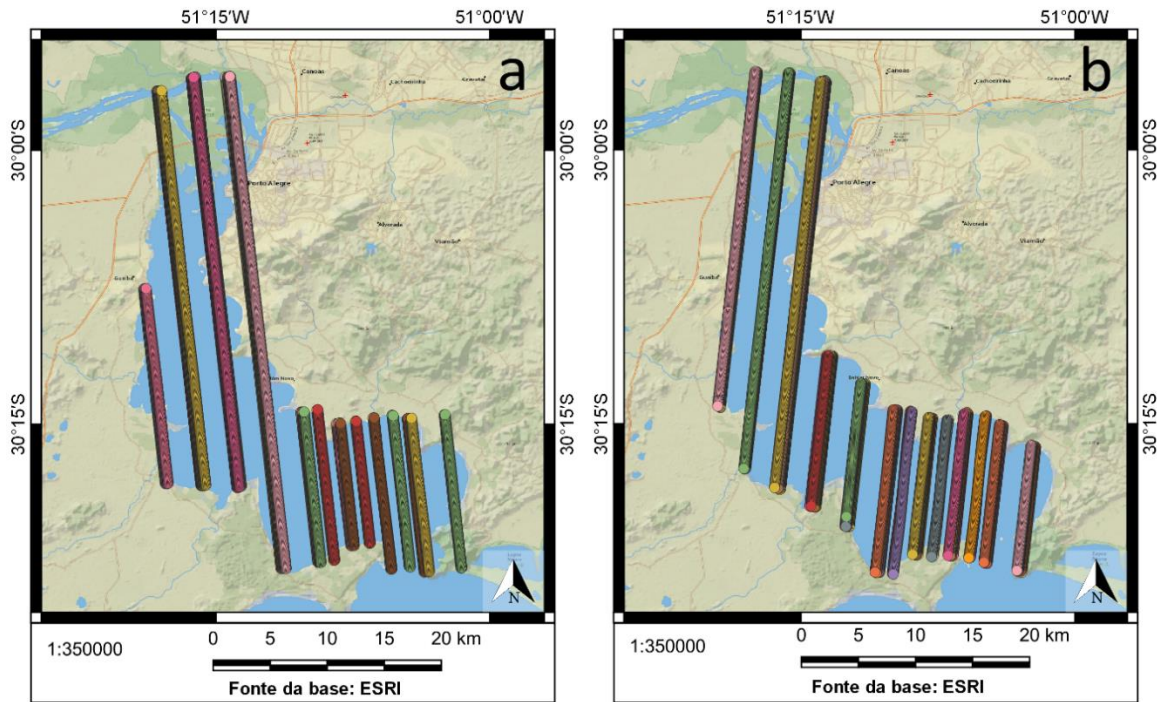
No quadro 30 é possível observar que o polinômio de grau 4 foi o mais adequado para 50% das trilhas das faixas 551/993 e 38,37% das trilhas das faixas 757/1199, com o polinômio de grau 3 sendo o segundo em número de trilhas. Isto parece demonstrar que a superfície da água não se comporta, na maior parte do tempo, de uma forma linear devido às influências meteorológicas e, para grandes corpos de água, outras influências como marés, campo gravitacional e força centrífuga devido a rotação da Terra. As trilhas nas quais os polinômios de primeiro e segundo grau foram mais adequados, são trilhas mais curtas, que podem ser representadas por uma reta, ou uma parábola, para o caso da existência de “colinas” ou “vales” submersos entre as margens. No caso do Lago Guaíba, há o canal de navegação.

A partir do melhor ajuste, foram determinadas as incertezas (desvio padrão) para cada ponto, propagadas a partir das próprias incertezas na determinação da altitude elipsoidal pelo sensor lidar altímetro e pelas incertezas dos ajustamentos. A figura 87 mostra as trilhas das faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b) ajustadas.

Com as trilhas ajustadas, foram determinados os desníveis sobre a superfície da água a partir dos pontos mais próximos das estações linimétricas/linigráficas e interpolados entre duas trilhas quando possível. Os desníveis sobre a superfície da água foram determinados entre as estações linimétricas/linigráficas Cais Mauá C6 – Cristal, Cais Mauá C6 – Ipanema, Cais Mauá C6 – Terminal CatSul Guaíba, Cristal – Ipanema, Cristal – Terminal CatSul Guaíba e Ipanema – Terminal CatSul Guaíba.

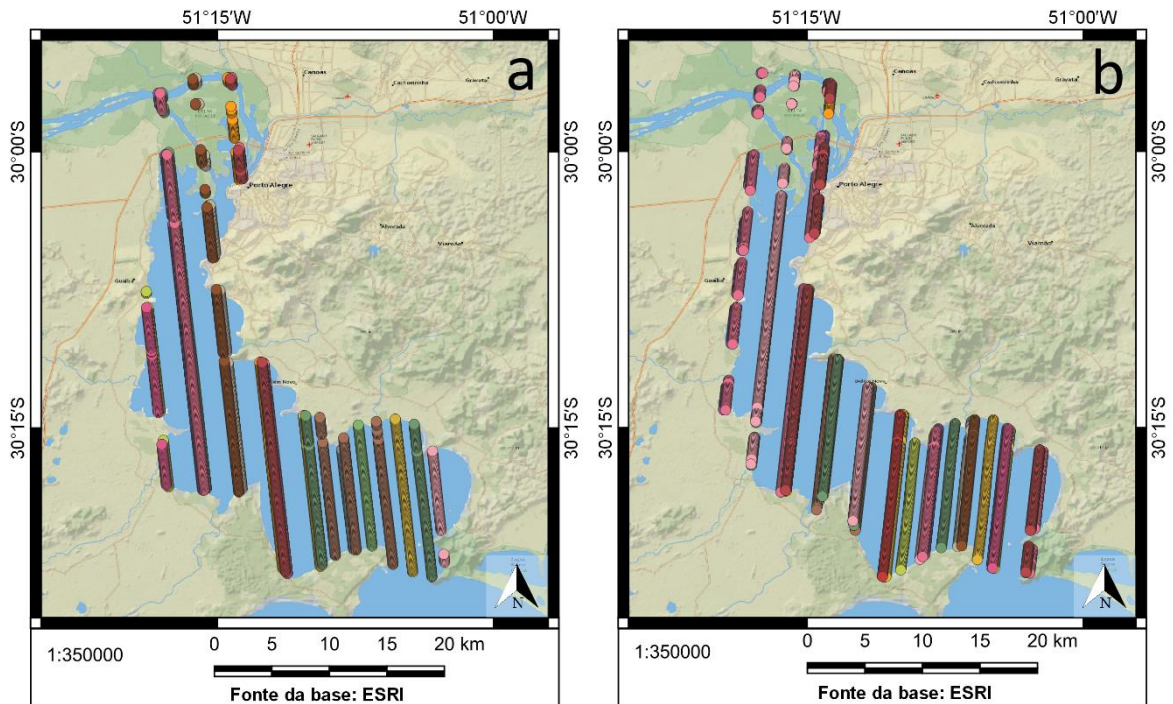
A figura 88 mostra as trilhas médias espaciais para cada conjunto de trilhas ajustadas, para as faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b) e a figura 89 apresenta as trilhas médias temporais para todas as faixas.

Figura 87 – Conjuntos de trilhas ajustadas para as faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b), onde cada cor representa um conjunto.



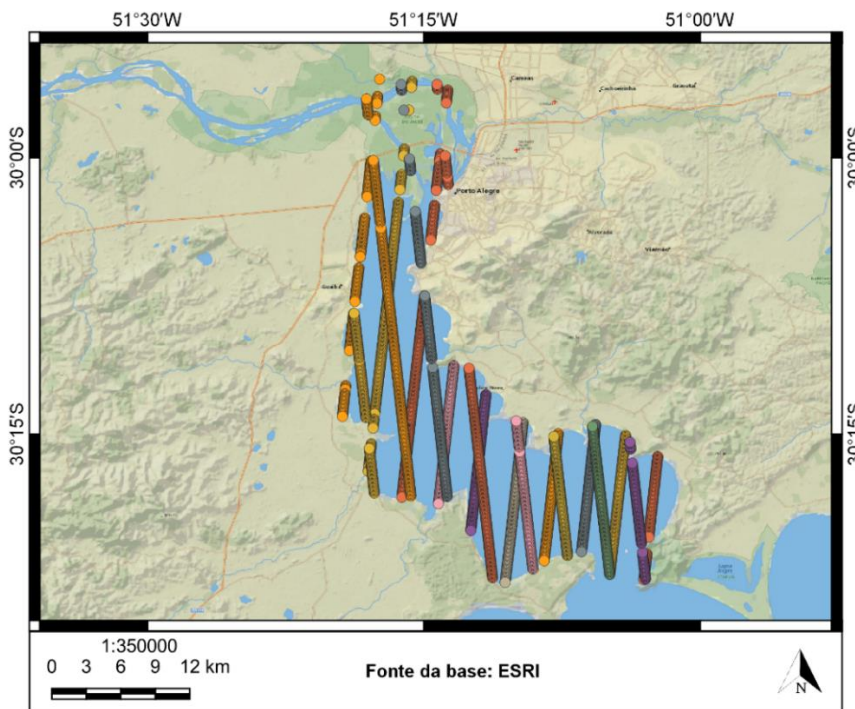
Fonte: Elaboração própria.

Figura 88 – Conjunto de trilhas ajustadas médias espaciais para as faixas 551/993 (a) e 757/1199 (b), onde cada cor representa um conjunto.



Fonte: Elaboração própria.

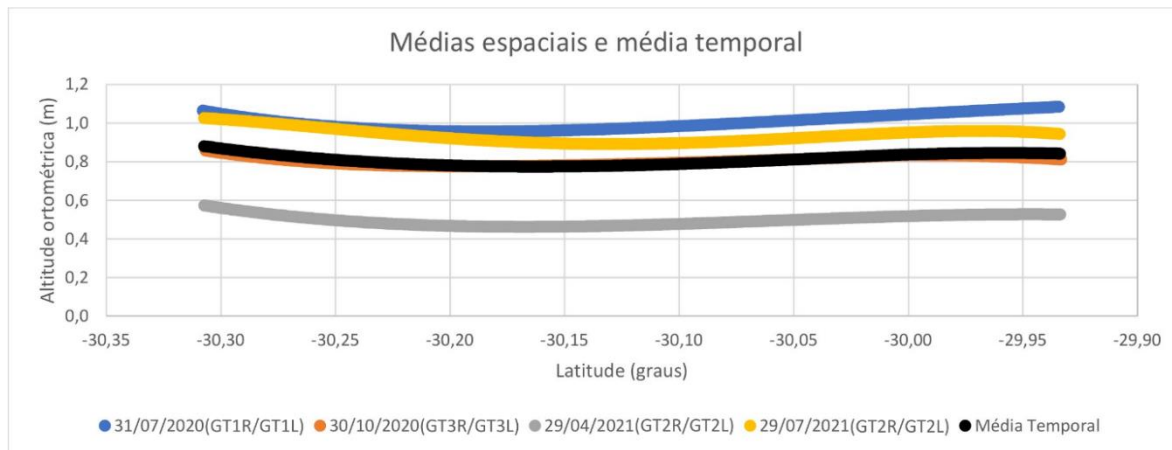
Figura 89 – Conjunto de trilhas ajustadas médias temporais para as faixas 551/993 e trilha 757/1199, onde cada cor representa um conjunto.



Fonte: Elaboração própria.

O gráfico da figura 90 indica um exemplo de sobreposição dos valores das trilhas ajustadas, média espacial e média temporal (completa) para o Conjunto 3 com as passagens do satélite em 31/07/2020, 30/10/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021.

Figura 90 – Gráfico exemplo de médias espaciais do conjunto-3 de trilhas e média temporal.

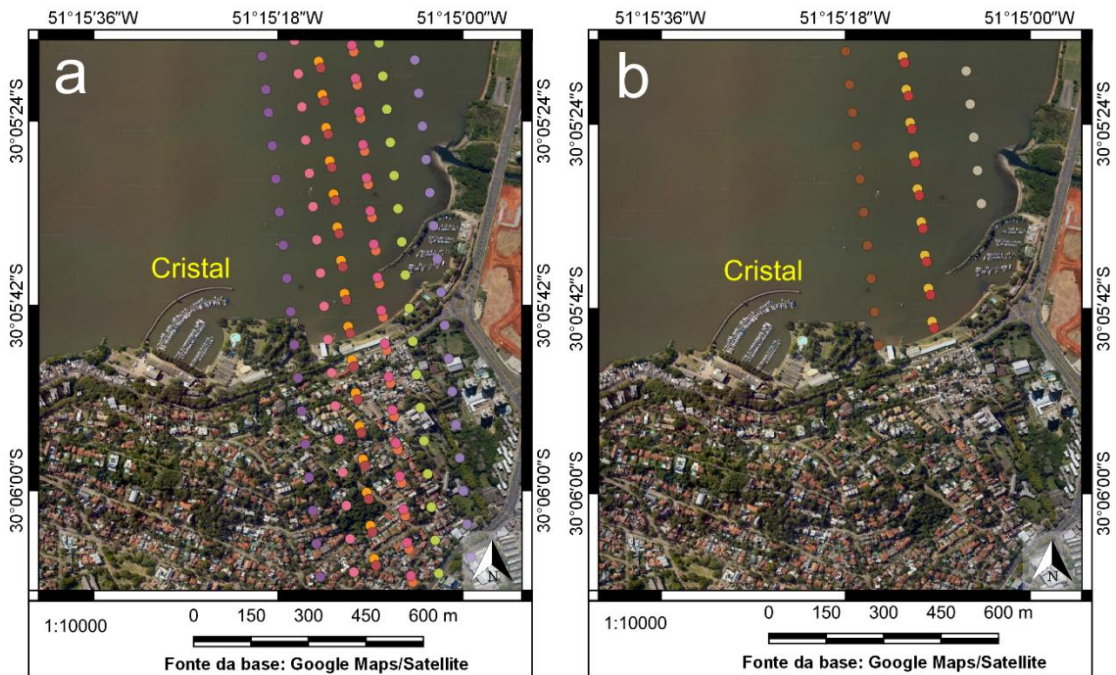


Fonte: Elaboração própria.



A figura 91 mostra, como exemplo, a estação linimétrica/linigráfica Cristal, as trilhas ajustadas individuais (figura 91a) e as médias espaciais (figura 91b).

Figura 91 – Exemplo de trilhas individuais ajustadas (a) e médias espaciais (b) em Cristal.



Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e Cristal houve a passagem do satélite para os dias e trilhas apresentados no quadro 31.

Quadro 31 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Cais Mauá C6 e Cristal.

<b>Estação</b>	<b>Data</b>	<b>Trilha</b>
Cais Mauá C6	31/01/2020	GT1L/GT1R
	31/07/2020	GT2L/GT2R
	29/04/2021	GT3L/GT3R
	29/07/2021	GT3L/GT3R
Cristal	31/07/2020	GT1L/GT1R
	30/10/2020	GT3L/GT3R
	29/04/2021	GT2L/GT2R
	29/07/2021	GT2L/GT2R

Fonte: Elaboração própria.

Foram calculados os desníveis para cada trilha entre Cais Mauá C6 e Cristal, cruzando-as entre si, desde que as trilhas estejam presentes, na mesma época, nas duas estações linimétricas/linigráficas. Nestas condições há as trilhas para os dias 31/07/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021. Como há um par de trilhas para cada data, simultaneamente para as duas estações linimétricas/linigráficas, há quatro possibilidades de cálculo de desnível. Com três dias de trilhas pareadas para Cais Mauá C6 e Cristal, têm-se 12 possibilidades para se determinar desníveis.

No desnível temporal foram calculados os desníveis no tempo e no espaço, sem que haja simultaneidade de trilhas nas duas estações linimétricas/linigráficas. Como há 4 datas de passagem em cada estação, há 16 possibilidades de cálculo de desnível. Excluindo três possibilidades pareadas, abordadas anteriormente, restam 13 desníveis.

A média espacial para cada par de trilhas (mesma época), a média temporal apenas com trilhas pareadas, a média temporal com todas as trilhas e o desnível temporal não pareado (épocas diferentes) são apresentadas no quadro 32.

Quadro 32 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Cristal.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
Média espacial	31/07/2020	0,1181	0,0019
	29/04/2021	-0,0753	0,0028
	29/07/2021	-0,0675	0,0115
Média temporal	Pareada	-0,0082	0,0040
	Completa	0,0444	0,0047
Desnível temporal	31/01/2020→31/07/2020	0,3924	0,0144
	31/01/2020→30/10/2020	0,2023	0,0145
	31/01/2020→29/04/2021	-0,1150	0,0145
	31/01/2020→29/07/2021	0,3035	0,0170
	31/07/2020→30/10/2020	-0,0720	0,0021
	31/07/2020→29/04/2021	-0,3893	0,0021
	31/07/2020→29/07/2021	0,0293	0,0093
	29/04/2021→31/07/2020	0,4321	0,0026
	29/04/2021→30/10/2020	0,2420	0,0028
	29/04/2021→29/07/2021	0,3432	0,0094
	29/07/2021→31/07/2020	0,0214	0,0070
	29/07/2021→30/10/2020	-0,1688	0,0071
29/07/2021→29/04/2021	-0,4860	0,0071	

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e Ipanema, as datas de passagem do satélite por Ipanema são mostradas no quadro 33.

Quadro 33 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Ipanema.

<b>Estação</b>	<b>Data</b>	<b>Trilha</b>
Ipanema	31/07/2020	GT1L/GT1R
	30/10/2020	GT3L/GT3R
	29/04/2021	GT2L/GT2R
	29/07/2021	GT2L/GT2R

Fonte: Elaboração própria.

Pareada ao Cais Mauá C6 e Ipanema, há passagem do satélite nos dias 31/07/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021. Para os três dias há quatro possibilidades por dia, totalizando 12 possibilidades de cálculo de desnível. Em Ipanema, também foi possível interpolar os valores de altitudes ortométricas entre duas trilhas adjacentes (Conjunto-3 e Conjunto-4).

No desnível temporal, já excluídas as trilhas da mesma época (pareadas), há 13 possibilidades de cálculo dos desníveis a partir dos pontos mais próximos à estação de Ipanema e 9 para os pontos interpolados.

As médias espaciais, temporais e desnível temporal não pareado entre o Cais Mauá C6 e Ipanema são apresentadas nos quadros 34 (pontos mais próximos) e 35 (pontos interpolados).

Quadro 34 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Ipanema (pontos mais próximos).

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
Média espacial	31/07/2020	0,0980	0,0019
	29/04/2021	-0,0885	0,0035
	29/07/2021	-0,0735	0,0088
Média temporal	Pareada	-0,0213	0,0032
	Completa	0,0315	0,0047
Desnível temporal	31/01/2020→31/07/2020	0,3723	0,0144
	31/01/2020→30/10/2020	0,1899	0,0160
	31/01/2020→29/04/2021	-0,1282	0,0146
	31/01/2020→29/07/2021	0,2976	0,0154



<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
	31/07/2020→30/10/2020	-0,0844	0,0072
	31/07/2020→29/04/2021	-0,4024	0,0030
	31/07/2020→29/07/2021	0,0233	0,0057
	29/04/2021→31/07/2020	0,4120	0,0026
	29/04/2021→30/10/2020	0,2296	0,0074
	29/04/2021→29/07/2021	0,3373	0,0060
	29/07/2021→31/07/2020	0,0013	0,0070
	29/07/2021→30/10/2020	-0,1812	0,0099
	29/04/2021→29/04/2021	-0,4992	0,0074

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 35 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Ipanema (pontos interpolados).

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
Média espacial	31/07/2020	0,0679	0,0031
	29/04/2021	-0,0699	0,0092
	29/07/2021	-0,0510	0,0154
Média temporal	Pareada	-0,0177	0,0061
	Completa	0,0328	0,0068
Desnível temporal	31/01/2020→31/07/2020	0,3422	0,0146
	31/01/2020→29/04/2021	-0,1096	0,0169
	31/01/2020→29/07/2021	0,3200	0,0199
	31/07/2020→29/04/2021	-0,3838	0,0090
	31/07/2020→29/07/2021	0,0457	0,0138
	29/04/2021→31/07/2020	0,3819	0,0036
	29/04/2021→29/07/2021	0,3597	0,0139
	29/07/2021→31/07/2020	-0,0289	0,0074
	29/07/2021→29/04/2021	-0,4806	0,0113

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba, há passagens dos satélites na estação Terminal CatSul Guaíba conforme mostra o quadro 36.

Quadro 36 – Datas e trilhas da passagem do satélite em Terminal CatSul Guaíba.

<b>Estação</b>	<b>Data</b>	<b>Trilha</b>
Terminal CatSul Guaíba	14/02/2020	GT2L/GT2R
	11/02/2021	GT1L/GT1R

Fonte: Elaboração própria.

Como Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba estão sobre faixas diferentes, cujas épocas de passagem do satélite não coincidem, foi usado o cruzamento entre as faixas 551 e 757 no meio da área de estudo. Os pontos sobre cada faixa foram denominados T-551 e T-757, com T denotando transição. As passagens do satélite nos pontos sobre a transição são mostradas no quadro 37.

Quadro 37 – Datas e trilhas da passagem do satélite em T-551 e T-757.

<b>Estação</b>	<b>Data</b>	<b>Trilha</b>
T-551	01/05/2020	GT3L/GT3R
	30/10/2020	GT2L/GT2R
	29/07/2021	GT1L/GT1R
	29/04/2021	GT1L/GT1R
T-757	17/11/2018	GT3L/GT3R
	17/05/2019	GT3L/GT3R
	14/02/2020	GT1L/GT1R
	12/08/2021	GT3L/GT3R
	09/02/2022	GT3L/GT3R

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e T-551 são pareadas as passagens do satélite em 20/04/2021 e 29/07/2021, provendo 8 possibilidades de cálculo de desnível. No cruzamento das faixas 551 e 757, os desníveis entre os pontos T-551 e T-557 apresentam também 8 possibilidades de cálculo de desnível para os dias 20/04/2021 e 29/07/2021. Entre T-757 e o Terminal CatSul Guaíba há apenas uma trilha pareada no dia 14/02/2020, desta forma, há apenas 4 possibilidades de cálculo de desnível.

As médias espaciais e temporais para as passagens pareadas dos satélites são apresentadas nos quadros 38, 39 e 40.

Quadro 38 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e T-551.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	29/04/2021	-0,1238	0,0048
	29/07/2021	-0,0902	0,0099
Média temporal	Pareada	-0,1070	0,0055
	Completa	-0,0973	0,0049

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 39 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-551 e T-757.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	29/04/2021→14/02/2020	-0,4567	0,0043
	29/07/2021→14/02/2020	-0,9009	0,0070
Média temporal	Pareada	-0,6788	0,0042
	Completa	-0,1174	0,0036

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 40 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-757 e Terminal CatSul Guaíba.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	14/02/2020	0,0407	0,0014
Média temporal	Pareada	0,0407	0,0014
	Completa	-0,2833	0,0026

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba há 16 possibilidades de cálculo de desnível entre 29/04/2021→14/02/2020, 16 possibilidades para 29/07/2021→14/02/2020 (total de 32) e 8 possibilidades para o desnível temporal não pareado.

As médias espaciais, temporais pareadas e desnível temporal não pareado entre Cais Mauá C6 e Guaíba são apresentados no quadro 41.

Quadro 41 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	29/04/2021→14/02/2020	-0,5398	0,0066
	29/07/2021→14/02/2020	-0,9505	0,0122
Média temporal	Pareada	-0,7451	0,0071
	Completa	-0,4980	0,0066
Desnível temporal	31/01/2020→14/02/2020	-0,5795	0,0144
	31/01/2020→11/02/2021	-0,1139	0,0145
	31/07/2020→14/02/2020	-0,8537	0,0020
	31/07/2020→11/02/2021	-0,3881	0,0024
	29/04/2021→14/02/2020	-0,5398	0,0027
	29/04/2021→11/02/2021	-0,0742	0,0030
	29/07/2021→14/02/2020	-0,9505	0,0071
	29/07/2021→11/02/2021	-0,4849	0,0072

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cristal e Ipanema há simultaneamente trilhas nos dias 31/07/2020, 30/10/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021 para os pontos mais próximo à estação Ipanema e trilhas pareadas para os dias 31/07/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021 para os pontos interpolados, respectivamente com 16 e 12 desníveis calculados.

Os desníveis temporais não pareados contam com 12 possibilidades de cálculo de desnível para os pontos mais próximos à Ipanema e 9 possibilidades para os pontos interpolados.

Nos quadros 42 e 43 são apresentadas as médias espaciais, temporais pareadas e desníveis temporais não pareados para os pontos próximos à Ipanema e interpolados respectivamente.

Quadro 42 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Ipanema para os pontos próximos à Ipanema.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	31/07/2020	-0,0201	0,0004
	30/10/2020	-0,0124	0,0070
	29/04/2021	-0,0132	0,0026
	29/07/2021	-0,0060	0,0106
Média temporal	Pareada	-0,0129	0,0032
	Completa	-0,0129	0,0032
Desnível temporal	31/07/2020→30/10/2020	-0,2025	0,0070
	31/07/2020→29/04/2021	-0,5205	0,0024
	31/07/2020→29/07/2021	-0,0948	0,0054
	30/10/2020→31/07/2020	0,1700	0,0010
	30/10/2020→29/04/2021	-0,3304	0,0025
	30/10/2020→29/07/2021	0,0953	0,0055
	29/04/2021→31/07/2020	0,4873	0,0011
	29/04/2021→30/10/2020	0,3049	0,0070
	29/04/2021→29/07/2021	0,4126	0,0055
	29/07/2021→31/07/2020	0,0688	0,0091
	29/07/2021→30/10/2020	-0,1137	0,0114
	29/07/2021→29/04/2021	-0,4317	0,0094

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 43 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Ipanema para os pontos interpolados.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	31/07/2020	-0,0502	0,0025

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
	29/04/2021	0,0055	0,0045
	29/07/2021	0,0165	0,0114
	Pareada	-0,0094	0,0042
Média temporal	Completa	-0,0116	0,0037
Desnível temporal	31/07/2020→29/04/2021	-0,5019	0,0044
	31/07/2020→29/07/2021	-0,0724	0,0068
	30/10/2020→31/07/2020	0,1399	0,0027
	30/10/2020→29/04/2021	-0,3118	0,0045
	30/10/2020→29/07/2021	0,1177	0,0069
	29/04/2021→31/07/2020	0,4572	0,0027
	29/04/2021→29/07/2021	0,4350	0,0069
	29/07/2021→31/07/2020	0,0386	0,0094
	29/07/2021→29/04/2021	-0,4131	0,0101

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba, são usados os pontos de transição T-551 e T-757. Entre Cristal e T-551 há simultaneamente as trilhas para os dias 30/10/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021.

As médias espaciais e temporais entre Cristal e T-551, e T551 e T-757 são indicadas nos quadros 44 e 45. Entre T-757 e Guaíba estão no quadro 35.

Quadro 44 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e T-551.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	30/10/2020	-0,0244	0,0063
	29/04/2021	-0,0485	0,0042
	29/07/2021	-0,0227	0,0114
Média temporal	Pareada	-0,0319	0,0046
	Completa	-0,1417	0,0035

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 45 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-551 e T-757.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	30/10/2020→14/02/2020	-0,7980	0,0064
	29/04/2021→14/02/2020	-0,4567	0,0043
	29/07/2021→14/02/2020	-0,9009	0,0070
Média temporal	Pareada	-0,7185	0,0036
	Completa	-0,1174	0,0036

Fonte: Elaboração própria.

Os desníveis finais entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba tem 48 possibilidades de cálculo entre trilhas e 8 para os desníveis temporais não pareados. As médias espaciais, temporais e desníveis temporais não pareados estão no quadro 46.

Quadro 46 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	30/10/2020→14/02/2020	-0,7817	0,0091
	29/04/2021→14/02/2020	-0,4645	0,0062
	29/07/2021→14/02/2020	-0,8830	0,0135
Média temporal	Pareada	-0,7097	0,0048
	Completa	-0,5424	0,0044
Desnível temporal	31/07/2020→14/02/2020	-0,9718	0,0008
	31/07/2020→11/02/2021	-0,5062	0,0016
	30/10/2020→14/02/2020	-0,7817	0,0012
	30/10/2020→11/02/2021	-0,3161	0,0018
	29/04/2021→14/02/2020	-0,4645	0,0012
	29/04/2021→11/02/2021	0,0012	0,0018
	29/07/2021→14/02/2020	-0,8830	0,0091
	29/07/2021→11/02/2021	-0,4174	0,0092

Fonte: Elaboração própria.

Além da faixa 551, também há a possibilidade de usar a faixa 757 em Cristal, interpolando valores entre os conjuntos de trilhas 03 e 04. Assim, os desníveis entre Cristal e o ponto de transição T-757A tem, simultaneamente, as trilhas para os dias 17/11/2018, 17/05/2019, 12/08/2021 e 09/02/2022, com 16 possibilidades de cálculo de desnível, assim como para o ponto de transição T-757A e T-757B. O desnível T-757B já foi apresentado anteriormente como T-757. As médias espaciais e temporais entre Cristal e T-757A e, T-757A e T-757B são mostrados nos quadros 47 e 48. Entre T-757B e Terminal CatSul Guaíba já foi apresentado no quadro 35.

Quadro 47 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e T-757A.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	17/11/2018	-0,0278	0,0048
	17/05/2019	-0,0395	0,0059
	12/08/2021	-0,0236	0,0070
	09/02/2022	-0,0331	0,0117

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média temporal	Pareada	-0,0310	0,0039
	Completa	-0,1702	0,0035

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 48 – Desníveis médios espaciais e temporais entre T-757A e T-757B.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	17/11/2018→14/02/2020	-0,7229	0,0020
	17/05/2019→14/02/2020	-0,8736	0,0026
	12/08/2021→14/02/2020	-0,7457	0,0044
	09/02/2022→14/02/2020	-0,5657	0,0086
Média temporal	Pareada	-0,6960	0,0033
	Completa	0,0000	0,0034

Fonte: Elaboração própria.

Há 64 possibilidades de desnível entre trilhas de Cristal Para Terminal CatSul Guaíba e 8 possibilidades de desníveis temporais não pareados.

No quadro 49 são apresentadas as médias espaciais, temporais e desníveis temporais não pareados entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba, usando exclusivamente a faixa 757.

Quadro 49 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Cristal e Terminal CatSul Guaíba usando exclusivamente a faixa 757.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	17/11/2018	-0,7101	0,0054
	17/05/2019	-0,8724	0,0066
	12/08/2021	-0,7287	0,0084
	09/02/2022	-0,5582	0,0146
Média temporal	Pareada	-0,6863	0,0053
	Completa	-0,4535	0,0055
Desnível temporal	17/11/2018→14/02/2020	-0,6823	0,0018
	17/11/2018→11/02/2021	-0,2167	0,0022
	17/05/2019→14/02/2020	-0,8329	0,0024
	17/05/2019→11/02/2021	-0,3673	0,0028
	12/08/2021→14/02/2020	-0,7051	0,0042
	12/08/2021→11/02/2021	-0,2395	0,0045
	09/02/2022→14/02/2020	-0,5251	0,0086
	09/02/2022→11/02/2021	-0,0594	0,0087

Fonte: Elaboração própria.

Entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba, há 12 possibilidades de cálculo de desnível nos dias 30/10/2020, 29/04/2021 e 29/07/2021 entre Ipanema e T-551 para o ponto mais próximo e 8 possibilidades nos dias 29/04/2021 e 29/07/2021 para os pontos interpolados, com as médias espacial, temporal e desníveis temporais não pareados apresentados nos quadros 50 e 51. Os desníveis entre os pontos de transição T-551 e T-757 já foram indicados nos quadros 39 e 34 respectivamente. O desnível entre T-757 e Terminal CatSul Guaíba já foi apresentado no quadro 35.

Quadro 50 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e T-551 a partir dos pontos mais próximos.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
Média espacial	30/10/2020	-0,0042	0,0172
	29/04/2021	-0,0200	0,0050
	29/07/2021	-0,0092	0,0092
Média temporal	Pareada	-0,0111	0,0067
	Completa	-0,1254	0,0051

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 51 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e T-551 a partir dos pontos interpolados.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math> média (m)</b>
Média espacial	29/04/2021	-0,0539	0,0064
	29/07/2021	-0,0392	0,0043
Média temporal	Pareada	-0,0465	0,0070
	Completa	-0,1301	0,0036

Fonte: Elaboração própria.

Para os desníveis entre Itapema e Terminal CatSul Guaíba, há 48 possibilidades de cálculo entre trilhas e 8 para desníveis temporais não pareados com pontos mais próximos e 32 possibilidades de desnível entre trilhas e 6 para desníveis temporais não pareados nos pontos interpolados. As médias espaciais, temporais e desníveis temporais não pareados são apresentadas nos quadros 52 e 53.



Quadro 52 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba com pontos próximos à Ipanema.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	30/10/2020→14/02/2021	-0,7615	0,0184
	29/04/2021→14/02/2021	-0,4360	0,0068
	29/07/2021→14/02/2021	-0,8695	0,0117
Média temporal	Pareada	-0,6890	0,0078
	Completa	-0,5261	0,0068
Desnível temporal	31/07/2020→14/02/2020	-0,9688	0,0008
	31/07/2020→11/02/2021	-0,5032	0,0016
	30/10/2020→14/02/2020	-0,7615	0,0161
	30/10/2020→11/02/2021	-0,2959	0,0161
	29/04/2021→14/02/2020	-0,4360	0,0030
	29/04/2021→11/02/2021	0,0296	0,0033
	29/07/2021→14/02/2020	-0,8695	0,0062
	29/07/2021→11/02/2021	-0,4039	0,0063

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 53 – Desníveis médios espaciais e temporais entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba com pontos interpolados.

<b>Tipo</b>	<b>Época</b>	<b>Desnível (m)</b>	<b><math>\sigma</math>média (m)</b>
Média espacial	29/04/2021→14/02/2021	-0,4699	0,0075
	29/07/2021→14/02/2021	-0,8994	0,0121
Média temporal	Pareada	-0,6847	0,0072
	Completa	-0,5308	0,0066
Desnível temporal	31/07/2020→14/02/2020	-0,9216	0,0026
	31/07/2020→11/02/2021	-0,4560	0,0029
	29/04/2021→14/02/2020	-0,4699	0,0045
	29/04/2021→11/02/2021	-0,0043	0,0047
	29/07/2021→14/02/2020	-0,8994	0,0069
	29/07/2021→11/02/2021	-0,4338	0,0070

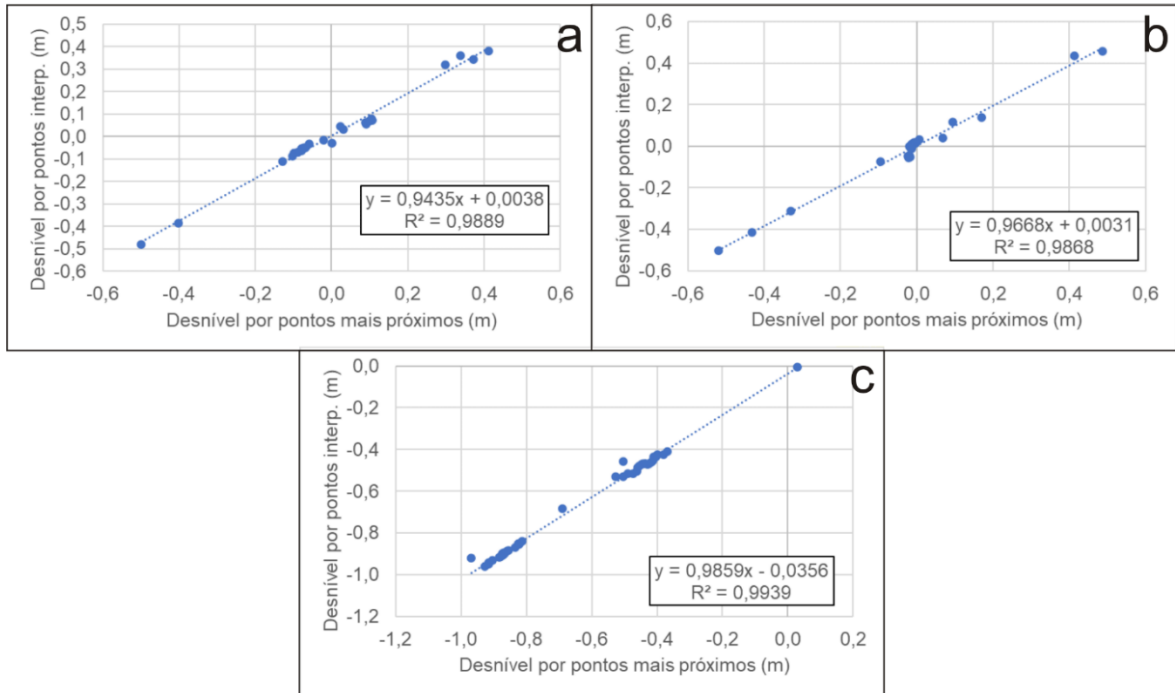
Fonte: Elaboração própria.

Nos cálculos dos desníveis, os desvios padrão tem valores ao nível do centímetro, com alguns valores decimétricos, provenientes principalmente das medidas da superfície da água pelo sensor altimétrico orbital. Os ajustamentos sempre retornaram desvios padrão subcentimétricos.

Os desníveis que envolveram a estação de Ipanema permitiram comparar os valores calculados a partir de pontos próximos à estação limimétrica e valores interpolados. Foi verificada uma forte correlação, com coeficientes de 0,9944, 0,9934

e 0,9969 para os desníveis entre Cais Mauá C6-Ipanema, Cristal-Ipanema e Ipanema-Terminal CatSul Guaíba respectivamente. A figura 92 mostra o gráfico de dispersão, tendência, equação e coeficiente de determinação.

Figura 92 – Gráficos de dispersão para os desníveis Cais Mauá C6-Ipanema (a), Cristal-Ipanema (b) e Ipanema-Terminal CatSul Guaíba (c).



Fonte: Elaboração própria.

Por fim foi realizado o teste t de student, cujos parâmetros e resultados são apresentados no quadro 54. Pelo teste t, os dois métodos foram considerados similares para os três cálculos de desníveis realizados.

Quadro 54 – Parâmetros e resultados do teste t de student para avaliação dos métodos de pontos mais próximos à estação Ipanema e pontos interpolados.

Linha	GL	t <sub>calculado</sub>	t <sub>tabelado</sub>	Resultado
Cais Mauá C6-Ipanema	50	-0,063812	2,008559	Aceito
Cristal-Ipanema	50	-0,063860	2,008559	Aceito
Ipanema-Terminal CatSul Guaíba	82	0,509642	1,989318	Aceito

Fonte: Elaboração própria.

A avaliação do método foi realizada a partir dos valores de discrepância para a conexão entre as referências de nível dos linímetros/linígrafos usando os métodos terrestres do nivelamento geométrico e nivelamento trigonométrico (conexões terra-terra e terra-água/água-terra) e nivelamento hidrográfico orbital (conexão água-água). Foram escolhidos os dias de passagem do satélite e das campanhas de levantamento do nível da superfície da água para a avaliação. Foram calculados os nivelamentos híbridos completos, usando todos os desníveis hidrográficos orbitais determinados (cruzamentos, médias espaciais, temporais pareadas, completas e desníveis temporais não pareados).

Entre Cais Mauá C6 e Cristal, foram empregadas todas as campanhas de levantamento da superfície da água, sendo 2 em Cais Mauá C6 e 6 em Cristal. Foram determinados os valores médios de desnível pelos métodos terrestres e pelo método hidrográfico orbital, usando as abordagens tipo-1 (época de passagem do satélite, simultâneo às duas estações linimétricas/linigráficas), tipo-2 (média espacial usando todas as conexões), tipo-3 (média temporal pareada e completa) e tipo-4 (desnível temporal), as discrepâncias entre o método hidrográfico orbital e os métodos terrestres e suas avaliações em termos de erro quadrático médio (EQM). O quadro 55 mostra os valores para a média de 6 campanhas de levantamento completas, o quadro 56 os valores para as médias excluindo os levantamentos efetuados diretamente sobre o linímetro em Cristal (média parcial) e o quadro 57 usando a determinação do “zero da régua” no dia 26/10/2018.

Quadro 55 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média completa.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
<b>Linha GP1-P3 (nivelamento terrestre)</b>		0,6360	-	0,0021	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,6434	0,0074	0,0070	
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>	0,5785	-0,0575	0,0047	
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,5804	-0,0556	0,0014
		<b>Completa</b>	0,6126	-0,0234	0,0015
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,6510	0,0150	0,0054	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 56 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média parcial.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
Linha GP1-P3 (nivelamento terrestre)		0,6360	-	0,0021	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
Época de passagem do satélite (tipo-1)		0,6538	0,0178	0,0086	
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,6000	-0,0360	0,0052
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	0,6031	-0,0329	0,0011
		Completa	0,6330	-0,0030	0,0016
Desnível temporal (tipo-4)		0,6615	0,0255	0,0067	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 57 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Cristal (P3) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, com média completa e medidas da superfície da água no Cais Mauá C6 em 26/10/2018.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
Linha GP1-P3 (nivelamento terrestre)		0,6360	-	0,0021	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
Época de passagem do satélite (tipo-1)		0,3244	-0,3116	0,0468	
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,2596	-0,3764	0,0585
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	0,2615	-0,3745	0,0543
		Completa	0,2936	-0,3424	0,0467
Desnível temporal (tipo-4)		0,3321	-0,3029	0,0432	

Fonte: Elaboração própria.

Como já observado nos resultados da conexão terra-água pelo nivelamento trigonométrico, as medidas realizadas em 26/10/2018 têm discrepâncias decimétricas devido aos possíveis problemas já citados anteriormente (penetração do sinal na água ou alteração do ponto de referência do linígrafo). Nas condições apresentadas nos quadros 55 e 56, as discrepâncias das médias, quando excluídas as medidas realizadas diretamente sobre o linímetro, são em geral melhores, exceto para as abordagens tipo-1 e tipo-4. Entre Cais Mauá C6 e Cristal, o melhor método foi a média temporal completa (tipo-3) com discrepância de -0,0030 m com EQM de 0,0016 m.

Entre Cais Mauá C6 e Ipanema, foram determinados os valores seguindo as mesmas abordagens descritas anteriormente, tanto para os pontos mais próximos à Ipanema quanto aos pontos interpolados a partir dos conjuntos de trilhas 3 e 4 como mostram os quadros 58 e 59.

Quadro 58 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos mais próximos.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
Linha GP1-RN1 (nivelamento terrestre)		-0,0055	-	0,0088
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
Época de passagem do satélite (tipo-1)		0,0395	0,0450	0,0197
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,0195	0,0250
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	-0,0177	-0,0122
		Completa	0,0197	0,0252
Desnível temporal (tipo-4)		-0,0199	-0,0144	0,0077

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 59 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos interpolados.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
Linha GP1-RN1 (nivelamento terrestre)		-0,0055	-	0,0088
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
Época de passagem do satélite (tipo-1)		0,0356	0,0411	0,0131
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,0156	0,0211
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	-0,0120	-0,0065
		Completa	0,0236	0,0291
Desnível temporal (tipo-4)		-0,0027	0,0028	0,0109

Fonte: Elaboração própria.

Entre Cais Mauá C6 e Ipanema, os desníveis orbitais calculados a partir dos pontos interpolados tem resultados ligeiramente melhores (milimétrico). O melhor resultado foi alcançado (a partir dos pontos interpolados) por meio da abordagem tipo 3 (média temporal apenas com trilhas pareadas), com discrepância de -0,0065 m e EQM de 0,0007 m. Na verdade, a menor discrepância foi a partir da abordagem tipo-4 (desnível temporal), mas com valor de EQM maior (0,0028 m e EQM de 0,0378 m).

Os resultados entre Cais Mauá C6 e Terminal CatSul Guaíba são apresentados no quadro 60.

Quadro 60 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cais Mauá C6 (GP1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
<b>Linha GP1-P4 (nivelamento terrestre)</b>		0,3140	-	0,0600
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,9681	0,6541	0,4298
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>		0,7646	0,4506
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,7646	0,4506
		<b>Completa</b>	0,4121	0,0981
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,9974	0,6834	0,4779

Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser notado no quadro 60, as discrepâncias são decimétricas, com o melhor resultado alcançado pela média temporal completa (tipo-3), com 0,0981 m e EQM de 0,0097 m. Os resultados evidenciam problemas nas observações do linígrafo, nas trilhas do satélite altímetro ou ambos. Este problema será abordado mais adiante.

Entre Cristal e Ipanema, também foram usadas todas as 6 campanhas de levantamento da superfície da água em Cristal. Além disso, foram usados os desníveis hidrográficos orbitais determinados a partir dos pontos interpolados e dos pontos mais próximos à estação linimétrica de Ipanema. O quadro 61 mostra os valores para a média de 6 campanhas de levantamento completa e o quadro 62 os valores para a média excluindo os levantamentos efetuados diretamente sobre o linímetro em Cristal (média parcial), ambos para os pontos mais próximos à Ipanema. O quadro 63

apresenta os valores para a média completa e o quadro 64 os valores para a média parcial para os pontos interpolados.

Quadro 61 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos mais próximos à Ipanema e média completa.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
<b>Linha P3-RN1 (nivelamento terrestre)</b>		-0,6415	-	0,0090	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		-0,6228	0,0187	0,0006	
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>	-0,5988	0,0427	0,0008	
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	-0,6172	0,0243	0,0008
		<b>Completa</b>	-0,6007	0,0408	0,0008
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		-0,6294	0,0121	0,0032	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 62 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos mais próximos à Ipanema e média parcial.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
<b>Linha P3-RN1 (nivelamento terrestre)</b>		-0,6415	-	0,0090	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		-0,6333	0,0082	0,0004	
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>	-0,6225	0,0190	0,0005	
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	-0,6234	0,0181	0,0005
		<b>Completa</b>	-0,6234	0,0181	0,0005
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		-0,6399	0,0016	0,0038	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 63 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos interpolados e média completa.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
Linha P3-RN1 (nivelamento terrestre)		-0,6415	-	0,0090	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
Época de passagem do satélite (tipo-1)		-0,6263	0,0152	0,0003	
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)	-0,6034	0,0381	0,0012	
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	-0,5972	0,0443	0,0009
		Completa	-0,5994	0,0421	0,0008
Desnível temporal (tipo-4)		-0,6040	0,0375	0,0028	

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 64 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Ipanema (RN1) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando os pontos interpolados e média parcial.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)	
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>					
Linha P3-RN1 (nivelamento terrestre)		-0,6415	-	0,0090	
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>					
Época de passagem do satélite (tipo-1)		-0,6367	0,0048	0,0000	
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)	-0,6268	0,0147	0,0009	
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	-0,6199	0,0216	0,0006
		Completa	-0,6220	0,0195	0,0005
Desnível temporal (tipo-4)		-0,6144	0,0271	0,0029	

Fonte: Elaboração própria.

Os melhores resultados foram alcançados novamente pela média parcial. Para os pontos mais próximos à Ipanema, o melhor valor foi de 0,0082 m e EQM de 0,0004 m para a abordagem tipo-1 (época de passagem do satélite). A menor discrepância foi de 0,0016 m, porém com um EQM maior, de 0,0038 m. Porém, os cálculos utilizando os pontos interpolados, para a média parcial, resultou em uma discrepância de 0,0048 m com EQM de 0,0000 m, a melhor encontrada.



Entre Cristal e Guaíba, além das 6 campanhas de levantamento da superfície da água em Cristal, foram usados os desníveis hidrográficos orbitais determinados a partir das trilhas nas faixas 551 e 757. O quadro 65 mostra os valores para a média completa e o quadro 66 os valores para a média parcial sobre a faixa 551 até o ponto de transição. O quadro 67 apresenta os valores para a média completa e o quadro 68 os valores para a média parcial para os pontos interpolados.

Quadro 65 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 551 até o ponto de transição e média completa.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
<b>Linha P3-P4 (nivelamento terrestre)</b>		-0,3220	-	0,0600
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,4238	0,7458	0,2310
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>		0,2898	0,6118
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,2898	0,6118
		<b>Completa</b>	-0,2231	0,0989
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,3633	0,6853	0,1957

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 66 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 551 até o ponto de transição e média parcial.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
<b>Linha P3-P4 (nivelamento terrestre)</b>		-0,3220	-	0,0600
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,4134	0,7354	0,2748
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>		0,2672	0,5892
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,2671	0,5891
		<b>Completa</b>	-0,2519	0,0701
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,3529	0,6749	0,2323

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 67 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 757 até o ponto de transição e média completa.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
<b>Linha P3-P4 (nivelamento terrestre)</b>		-0,3220	-	0,0600
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,3499	0,6719	0,1877
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>		0,2935	0,6155
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,2907	0,6127
		<b>Completa</b>	-0,2516	0,0704
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,3364	0,6584	0,1759

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 68 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Cristal (P3) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, usando a faixa 757 até o ponto de transição e média parcial.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
<b>Linha P3-P4 (nivelamento terrestre)</b>		-0,3220	-	0,0600
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
<b>Época de passagem do satélite (tipo-1)</b>		0,3395	0,6615	0,2226
<b>Todas as conexões</b>	<b>Média espacial (tipo-2)</b>		0,2708	0,5928
	<b>Média temporal (tipo-3)</b>	<b>Pareada</b>	0,2680	0,5900
		<b>Completa</b>	-0,2804	0,0416
<b>Desnível temporal (tipo-4)</b>		0,3136	0,6356	0,2068

Fonte: Elaboração própria.

Novamente a média parcial se mostrou melhor que a média completa, o que mostra a melhor qualidade do método usando o nivelamento trigonométrico diretamente sobre a superfície da água de forma contínua comparando com a medida diretamente sobre o linímetro, provavelmente devido à falta de uma série de medidas (a determinação foi realizada em uma medida única). O melhor valor foi alcançado a partir da média temporal completa (tipo-3), com 0,0701 m e EQM de 0,0027 m para a faixa 551 e 0,0416 m com EQM de 0,0011 m para a faixa 757, mostrando o melhor

resultados para este último. Da mesma forma que a linha Cais Mauá C6 para Terminal CatSul Guaíba, houveram discrepâncias centimétricas para as demais abordagens.

Entre Ipanema e Terminal CatSul Guaíba, para os pontos mais próximos à Ipanema e para os pontos interpolados, são mostrados os resultados alcançados nos quadros 69 e 70.

Quadro 69 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Ipanema (RN1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos mais próximos à Ipanema.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
Linha RN1-P4 (nivelamento terrestre)		0,3195	-	0,0606
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
Época de passagem do satélite (tipo-1)		1,1266	0,8071	0,6531
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,8230	0,5035
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	0,8185	0,4990
		Completa	0,3756	0,0561
Desnível temporal (tipo-4)		1,0229	0,7034	0,5036

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 70 – Desníveis, discrepâncias e incertezas entre Ipanema (RN1) e Terminal CatSul Guaíba (P4) via nivelamentos terrestres e hidrográfico orbital, a partir dos pontos interpolados.

Tipo		Desnível (m)	Discrepância (m)	EQM (m)
<b>Nivelamentos terrestres (geométrico e trigonométrico)</b>				
Linha RN1-P4 (nivelamento terrestre)		0,3195	-	0,0606
<b>Nivelamento hidrográfico orbital</b>				
Época de passagem do satélite (tipo-1)		1,0677	0,7482	0,5609
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)		0,7905	0,4710
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	0,7832	0,4637
		Completa	0,3756	0,0561
Desnível temporal (tipo-4)		0,4709	0,1514	0,0234

Fonte: Elaboração própria.

O melhor resultado, tanto para os pontos mais próximos à Ipanema quanto para os pontos interpolados, foi de 0,0561 m e EQM de 0,0038 m para a média temporal completa (tipo-3). As demais abordagens resultaram em valores decimétricos.

A discrepância média entre o nivelamento terrestre e o nivelamento hidrográfico orbital, por abordagem é apresentada no quadro 71. Para este cálculo não foram consideradas as linhas para o Terminal CatSul Guaíba.

Quadro 71 – Discrepâncias e incertezas médias por abordagem.

Tipo		Discrepância (m)	EQM (m)	
Época de passagem do satélite (tipo-1)		0,0234	0,0050	
Todas as conexões	Média espacial (tipo-2)	0,0088	0,0019	
	Média temporal (tipo-3)	Pareada	-0,0024	0,0004
		Completa	0,0178	0,0006
Desnível temporal (tipo-4)		0,0085	0,0031	

Fonte: Elaboração própria.

A melhor abordagem foi a média temporal pareada, com -0,0024 m e EQM de 0,0004 m. A média geral para todas as abordagens foi 0,0112 m e EQM de 0,0062 m.

Para comparar a qualidade alcançada com as normas brasileiras NBR13.133 e especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro, foram medidas as distâncias aproximadas entre cada estação linimétrica/linigráfica, por terra e pela água. As discrepâncias, a partir dos melhores resultados alcançados, foram consideradas erros de fechamento de um nivelamento híbrido. Com estes valores foram calculadas as precisões relativas para cada linha pela água e o erro tolerável se o nivelamento fosse executado exclusivamente sobre a terra, usando um nível com precisão nominal de 1,5 mm/km (quadro 72).

Quadro 72 – Melhores resultados da avaliação do fechamento para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital.

Linha	Distância (km)		Erro tolerável (m)	Fechamento (m)	Precisão (mm/ $\sqrt{k}$ )
	Terra	Água			
SPH-Cristal	9,7	9,1	0,0145	-0,0030	1,0

Linha	Distância (km)		Erro tolerável (m)	Fechamento (m)	Precisão (mm/√k)
	Terra	Água			
SPH-Ipanema	16,2	13,0	0,0243	-0,0065	1,8
SPH-Guaíba	27,5	13,5	0,0412	0,0981	26,7
Cristal-Ipanema	7,8	5,5	0,0117	0,0048	2,0
Cristal-Guaíba	36,7	5,5	0,0550	0,0416	17,7
Ipanema-Guaíba	42,9	8,2	0,0643	0,0561	19,6

Fonte: Elaboração própria.

A linha Cais Mauá C6 – Cristal mostrou precisão suficiente para controle geodésico de estações maregráficas. Em Cais Mauá C6 – Ipanema e Cristal – Ipanema a precisão permitiria o uso para vinculação entre estações maregráficas. As linhas Cristal-Terminal CatSul Guaíba e Ipanema-Guaíba atenderiam a NBR13.133:1994 para a classe IIN. Cais Mauá C6-Terminal CatSul Guaíba já extrapolaria a precisão do nivelamento geométrico, atendendo a classe IIIN para a NBR13.133:1994 e IIN para a NBR13.133:2021 (nivelamento trigonométrico).

Se for usado como parâmetro de avaliação as discrepâncias médias para cada abordagem, se alcançaria os valores apresentados no quadro 73 para o pior resultado (0,0234 m). Com a discrepância média geral, de 0,0112 m, os resultados seriam os indicados no quadro 74.

Quadro 73 – Resultados da avaliação do fechamento médio no pior caso para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital.

Distância pela água (km)	Fechamento (m)	Precisão (mm/√k)
9,1	0,0234	7,7
13,0		6,5
13,5		6,4
5,5		10,0
5,5		10,0
8,2		8,2

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 74 – Resultados da avaliação do fechamento médio geral para os nivelamentos híbridos usando métodos terrestres e hidrográfico orbital.

Distância pela água (km)	Fechamento (m)	Precisão (mm/√k)
9,1	0,0112	3,7

Distância pela água (km)	Fechamento (m)	Precisão ( $\text{mm}/\sqrt{k}$ )
13,0		3,1
13,5		3,0
5,5		4,8
5,5		4,8
8,2		3,9

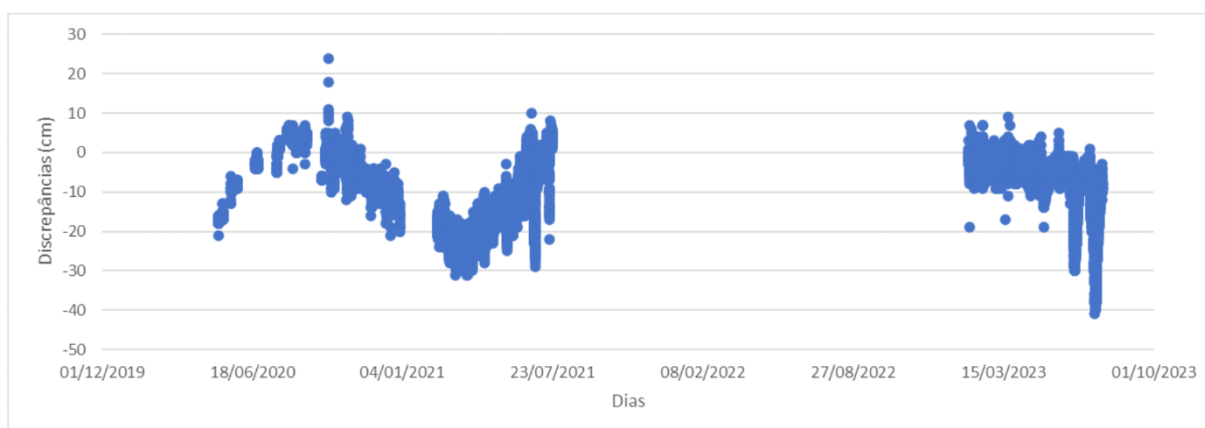
Fonte: Elaboração própria.

O pior resultado médio atende a NBR13.133 classe IN, ou seja, poderia ser aplicado de forma análoga ao nivelamento geométrico topográfico. O resultado da média geral final permite, segundo as especificações e normas para levantamentos geodésicos associados ao sistema geodésico brasileiro, aplicação fundamental para a densificação da rede altimétrica, se for considerado o valor máximo aceitável para fechamento de circuito.

As avaliações finais não levaram em conta as linhas para Terminal CatSul Guaíba devido às discrepâncias decimétricas observadas, com exceção da abordagem tipo-3 (média temporal completa), mas que ainda têm valores de discrepância bem acima da média para as outras linhas.

Observando a série de observações do linígrafo Terminal CatSul Guaíba e comparando-a com o linígrafo Cais Mauá C6, obtiveram-se as diferenças das leituras apresentadas no gráfico da figura 93.

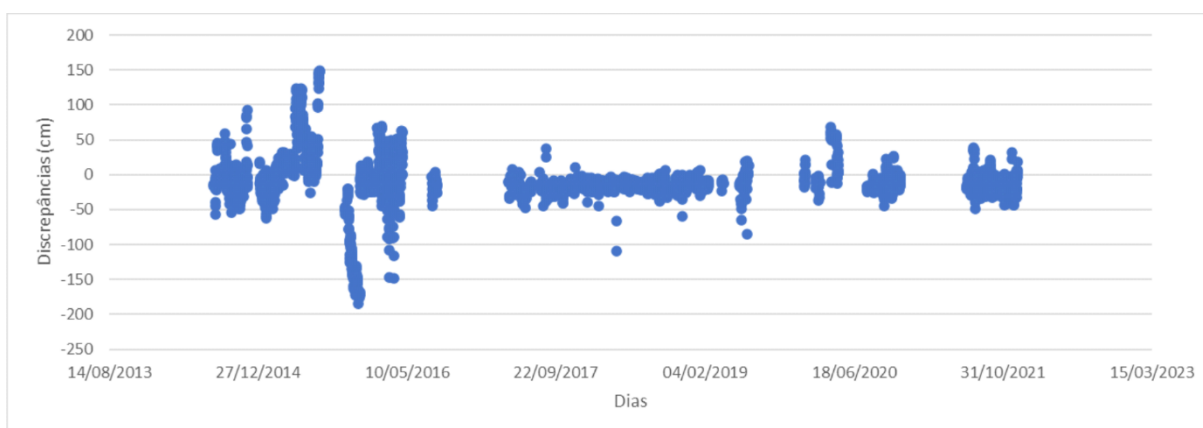
Figura 93 – Discrepâncias entre as observações dos linígrafos Terminal CatSul Guaíba e Cais Mauá C6.



Fonte: Elaboração própria.

Na figura 93 é possível observar que as diferenças no início da série são bastante irregulares até meados do ano de 2021, quando não houveram mais dados. Só a partir de 2023 o linígrafo retornou à atividade, com comportamento das diferenças mais linear. Esperava-se um comportamento similar ao apresentado entre Cais Mauá C6 e Cristal (figura 94), lembrando que são leituras brutas, não submetidas a análise de *outliers*, porém, mostram o comportamento com tendência linear. Além disso, a determinação do “zero da régua” em 2023 não tem efeito sobre as observações pré-2023 devido a possível alteração no ponto de referência do linígrafo, comprometendo os cálculos já que a passagem do satélite altímetro se deu neste momento crítico.

Figura 94 – Discrepâncias entre as observações dos linígrafos Cristal e Cais Mauá C6.



Fonte: Elaboração própria.

Além das observações comprometidas do linígrafo, em 14/02/2020, no momento da passagem do satélite altímetro, não haviam dados disponíveis em Cristal e Ipanema, além do linígrafo Cais Mauá C6 apresentar um valor de observação baixo (16 cm). Isto pode significar um período de estiagem que podem ter causado “régua seca” em Ipanema, Cristal e Terminal CatSul Guaíba, e causando superestimativa do nível da superfície da água em Terminal CatSul Guaíba, já que na passagem do satélite pode ter sido medido o leito do Lago Guaíba e não a superfície da água. A melhora nos resultados, quando incluída a trilha de 11/02/2021 pode comprovar o fato, porém ainda com viés de piora causada pela trilha de 14/02/2020.





## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A integração de referenciais verticais usando métodos terrestres, como o nivelamento geométrico, está sujeita a erros sistemáticos, aleatórios e grosseiros, assim como qualquer outro método. Uma vez que os erros grosseiros tenham sido eliminados, os efeitos dos erros sistemáticos e aleatórios podem ser minimizados. No entanto, estes erros são cumulativos e seus valores aumentam à medida que aumenta a distância nivelada. No caso de regiões em que há corpos d'água, pode ser mais vantajoso, em termos de precisão, executar o nivelamento usando a superfície da água do que contornar o corpo de água por terra.

Os satélites radares altímetros vêm sendo usados com sucesso na determinação do nível da superfície do mar e de corpos hídricos continentais, com restrições de aplicação na costa e próximo às margens no caso de rios, lagos e lagoas. Foi verificado, em experimentos realizados no complexo formado pelo Lago Guaíba e Lagoa dos Patos no estado do Rio Grande do Sul, que dados com frequência de 1 Hz podem ser aplicados em corpos de água continentais com mais de 8 km de largura, já que os pontos válidos dos sensores radares altímetros chegam a até 4 km das margens da Lagoa dos Patos e seu uso no Lago Guaíba é inviável. Neste caso, corpos de água menores podem ser atendidos por dados com frequência de 20 Hz, desde que sejam devidamente tratados por apresentarem comportamento não homogêneo em cada passagem sobre o corpo hídrico. A maioria das missões têm razoável resolução temporal mais baixa cobertura espacial. A missão Cryosat-2, ao contrário, tem boa cobertura espacial, mas má distribuição temporal. Os sensores radares altímetros podem, no entanto, ser usados em conjunto com um modelo geoidal para gerar um modelo de topografia dinâmica média da superfície da água (MDT) a partir da validação cruzada usando todas as missões, cujos dados estejam disponíveis sobre o corpo de água. Os altímetros radares orbitais tem a vantagem de prover medidas da superfície da água sob quaisquer condições climáticas, porém, tem a desvantagem de ter uma pegada sobre a superfície na ordem de quilômetros, o que faz com que a precisão se degrade próximo às margens devido a contaminação da terra. Existe potencial na altimetria orbital por radar, no entanto métodos e critérios de processamento de dados devem ser mais rigorosos para vencer as dificuldades devido a contaminação dos sinais devido a presença de solo e vegetação na zona observada.

Uma alternativa para corpos de água menores é o uso de sensores lidar orbitais, como o embarcado no satélite ICESat-2, que possui pegada na ordem de metros e consegue prover pontos válidos até próximo às margens. Têm boa cobertura espacial e razoável cobertura temporal, com a desvantagem de depender das condições atmosféricas para efetuar a mensuração da superfície da água. Dois produtos provenientes do processamento dos dados do sensor Atlas do ICESat-2 podem ser usados na determinação da altura da superfície da água em relação ao elipsoide: ATL08 e ATL13. O produto ATL08 é destinado à determinação da altura da vegetação, superfície sólida e da água continental enquanto o produto ATL13 é usado para a determinação exclusiva da superfície da água, continental e costa oceânica. Os testes realizados para a superfície da água mostram que os dois produtos são similares, além do produto ATL13 não estar disponível para além de 7 km da costa ou das margens do corpo hídrico, o que criou uma lacuna no interior da Lagoa dos Patos, que foi considerado “oceano” e, por consequência, suas margens consideradas costa. A classificação dos corpos de água costeiros, para o produto ATL13, deveria ser realizada de forma mais cuidadosa afim de evitar erros de avaliação e geração de lacunas em seu interior. A falta de dados prejudica a aplicação da metodologia do nivelamento híbrido para integração de referenciais verticais, que felizmente teve a possibilidade de ser coberto pelo produto ATL08.

A conexão entre a terra e a água em um nivelamento híbrido, usando métodos terrestres e hidrográfico orbital, requer a observação do nível da água com uma certa constância para algumas abordagens. Neste caso, é necessária a presença de linímetros/linígrafos para este intento. A cobertura na área de pesquisa é razoável, possuindo dois linígrafos automáticos telemétricos (radar) e duas estações compostas de réguas linimétricas. Como verificado, o Lago Guaíba é razoavelmente bem servido de estações linimétricas/linigráficas, porém a Lagoa dos Patos tem cobertura pobre, o que pode dificultar, porém não impedir, a aplicação do nivelamento híbrido com a qualidade almejada. O ideal seria existir redundância quanto aos dados do nível da superfície das águas interiores a partir de sensores automáticos telemétricos, com maior densidade na distribuição dos linímetros/linígrafos, além da obrigatoriedade de estarem todos conectados a um mesmo referencial altimétrico (vertical). Esta rede de sensores de monitoramento permanente do nível da água poderia ser análoga à Rede Maregráfica Permanente Para a Geodésia do IBGE (RMPPG), porém pensada para

aplicações geodésicas e hidrológicas simultaneamente, como uma Rede Linigráfica Permanente Para a Geodésia (RLPPG).

Ter referências de nível de uma rede altimétrica oficial de alta precisão também é imprescindível, já que a intenção é integrar referenciais verticais usando a superfície da água. A região é coberta pela RAAP do SGB, porém as RRNN existentes são insuficientes. Há, porém, referências de nível da rede de referência cadastral municipal de Porto Alegre, cujas altitudes de referência partem das RRNN da RAAP, no entanto, estas altitudes são normais-ortométricas provenientes do reajustamento da RAAP em 2011, o que obrigou a usar este tipo de altitude para a avaliação do método.

Na parte terrestre do nivelamento híbrido, o nivelamento geométrico seria mais adequado a distâncias longas e o nivelamento trigonométrico poder ser aplicado em distâncias curtas, onde não haja a necessidade de movimentar a estação total para um novo ponto. O modo como o nivelamento geométrico foi executado, com nivelamento e contranivelamento medidos ao mesmo tempo, tem a vantagem na economia do tempo de execução, permitir o emprego do ajustamento pelo método dos mínimos quadrados como se fosse uma rede, o que confere mais qualidade nas determinações dos desníveis. Dos métodos de ajustamento dos desníveis calculados a partir do nivelamento geométrico, a simples compensação do erro de fechamento não é a ideal para trabalhos que exijam alta qualidade, pois apenas dividem os erros de forma proporcional à distância ou igualmente em função do número de estações. O ajustamento pelo MMQ é o indicado pois, além de ser mais rigoroso, disponibiliza informações estatísticas para a avaliação da sua qualidade. A avaliação realizada usando o método dos correlatos e paramétrico mostrou resultados quase iguais, com uma pequena diferença submilimétrica nos desvios padrão, causada provavelmente pela forma de como foram calculados, já que no método dos correlatos foi empregada uma planilha eletrônica e no método paramétrico foi usado o software Adjust, para a validação do ajustamento pelo método dos correlatos. No entanto, os valores ajustados dos desníveis foram iguais.

Para a integração terra-água/água-terra pelo nivelamento trigonométrico, a técnica de Leap-Frog é a opção ideal pois elimina algumas fontes de erro sistemático, como a tomada de altura da estação total com trena por exemplo, sendo obrigatório o uso de um alvo flutuante para as medidas de distância sobre a água. O uso do

dispositivo flutuador sobre a superfície da água também traz vantagens sobre o método de medida direta sobre o linímetro/linígrafo. Uma delas é a própria qualidade na determinação do ponto de referência do linímetro/linígrafo ou “zero da régua”, como ficou demonstrado na comparação entre métodos terrestres e hidrográfico orbital de nivelamento, onde excluindo os métodos de medidas direta na régua linigráfica o resultado das discrepâncias tiveram uma pequena melhora. Talvez isso se deva à falta de verticalidade da régua (inclinada), que pode induzir erros devido à medida de distância. Além disso, o dispositivo flutuador impede a penetração do sinal na água, retornando valores irreais de distância e, conseqüentemente, problemas na determinação da altura da superfície da água, como foi verificado no linígrafo Cais Mauá C6 entre as campanhas de levantamento realizadas em 2018 e em 2023, o que reflete também na determinação do “zero da régua”. Outra vantagem é que, como é uma série de medidas com alta frequência de observações (duas ou mais por segundo) e com possibilidade de longo tempo de ocupação, pode detectar fenômenos de baixa frequência da superfície da água. Os resultados alcançados entre o nivelamento trigonométrico sobre a superfície da água e as leituras médias no linímetro para a mesma época se mostraram compatíveis, como foi comprovado comparando a variabilidade do nível da água entre as épocas em que foram realizadas as cinco campanhas de levantamento (17/04/2023 até 20/04/2023 e 09/06/2023). O dispositivo flutuador se mostrou uma boa solução quando a água está mais calma, mas suscetível a qualquer movimento mais violento da água, necessitando de proteção contra pequenas ondas, como mostra a concepção de um futuro protótipo apresentada, além de ancoragem mais eficiente.

É importante que a determinação do “zero da régua” seja realizada com mais frequência para que seja possível verificar se há subsidência ou levantamento dos linímetros/linígrafos e, para em caso de manutenção, verificar se houve alteração no ponto de referência. O ideal seria realizar campanhas de levantamento, no máximo, semestrais, a cada manutenção realizada ou após eventos meteorológicos extremos. Caso haja destruição das régua/sensor, o método permite restabelecer as referências originais via locação do ponto de referência. Além da aplicação hidrográfica/hidrológica, os linímetros/linígrafos também deveriam ser pensados para aplicações geodésicas, com leituras mais frequentes e resolução de leitura milimétrica, além de manter uma certa frequência de manutenção para manter sempre

a mesma referência altimétrica e evitar “saltos” ou degraus nas séries temporais. Os intervalos de leitura de 15 minutos dos linígrafos automáticos telemétricos parecem ser adequados à proposta desta pesquisa, no entanto, as duas leituras diárias nas réguas linimétricas, são insuficientes para detectar de forma acurada a variação horária do nível da superfície da água e integrá-la às observações dos sensores altímetros orbitais.

O uso do GNSS também pode ajudar de forma complementar na manutenção, tanto dos linímetros/linígrafos quanto das referências de nível. Como as coordenadas têm referências globais, podem ser extremamente úteis para detectar movimentos locais da superfície, desde que as campanhas de levantamento sejam constantes e que o volume de dados seja suficiente para identificar as deformações e estimar a orientação e velocidade dos deslocamentos superficiais. Desta forma poderia ser garantida cada vez mais a manutenção e estabilidade da infraestrutura física geodésica local. Nesta pesquisa o GNSS não foi usado devido as limitações impostas pela vegetação em algumas estações linimétricas/linigráficas.

Embora a carga hidrológica seja um fator importante de deformação da superfície, como observado na região amazônica, localmente os fenômenos de subsidência e levantamento não afetariam os valores relativos de desnível, já que todos os pontos de referência estariam sobre o mesmo espaço. Porém, haveria variação dos valores absolutos de altitude.

Quanto aos dados do sensor lidar orbital, o baixo número de *outliers* mostra que há homogeneidade entre os pontos das trilhas. O emprego do critério de informação Akaike para determinar o melhor ajustamento também mostrou que a superfície da água não terá, na maior parte do tempo, um comportamento linear, e que ajustamentos com polinômios de grau 3 ou superior pode representar melhor os pontos ajustados. A topografia da superfície da água também depende de fatores atmosféricos e geofísicos.

O fator atmosférico, principalmente os ventos, podem fazer com que as declividades se invertam devido o pequeno desnível na superfície do Lago Guaíba, como foi observado para dias diferentes da passagem do satélite para quatro anos de observação do nível da superfície da água (2018 à 2022). Ressalta-se que condições extremas de vento, marés e/ou a conjugação dos dois fatores pode ser um fator que impeça a obtenção de dados com qualidade. O congelamento da superfície da água,

em regiões onde há o fenômeno, pode ser um fator impeditivo de aplicação do nivelamento hidrográfico orbital.

Algumas linhas, como as que incluem a estação linimétrica de Ipanema, têm possibilidade de usar pontos próximos à estação ou interpolação dos pontos de dois conjuntos de trilhas, porém, a diferença entre os desníveis não chega a ser significativa, embora haja uma pequena melhora usando os pontos interpolados.

Para o nivelamento híbrido completo, das quatro abordagens usadas para cada linha, os melhores resultados permitem a aplicação geodésica do método. As linhas para a estação Terminal CatSul Guaíba não tiveram bons resultados devido ao linígrafo e uma das trilhas do satélite altímetro. Por isso, apenas a abordagem tipo-3 (média temporal completa) poderia ser aproveitada para fins topográficos. Além disso, se fosse considerado o erro tolerável a partir da precisão nominal de um nível comum (1,5 mm/km) em um nivelamento puramente terrestre, os fechamentos usando o nivelamento híbrido são quase sempre menores, com exceção da linha Cais Mauá C6 – Terminal CatSul Guaíba. Em média, para a maior discrepância alcançada (0,0234 m), os dados atenderiam a NBR13133 para a classe IN. Por fim, a média geral de 0,0112 m, permite o uso dos dados e método para a densificação da rede altimétrica, considerando o valor máximo aceitável para fechamento de circuito. Na pesquisa realizada e para a área de estudo utilizada, para uma distância média, pela água, de aproximadamente 9 km, a precisão relativa média seria de  $3,7 \text{ mm}/\sqrt{k}$ , suficiente para aplicações geodésicas.

Uma das características do nivelamento hidrográfico orbital é de que a precisão absoluta dos dados dos sensores altímetros orbitais se mantém aproximadamente constante independente da distância, por isso, para linhas mais longas, talvez a precisão relativa seja ainda melhor.

Com os bons resultados obtidos a partir da missão lidar ICESat-2, a infraestrutura de observação do nível da água por linímetros/linígrafos deve ser boa e consistente, por isso seria importante o investimento em sensores automáticos telemétricos que disponibilizem dados com resolução de leitura milimétrica. A própria medida da superfície da água com sensor altímetro embarcado em satélite pode ser considerada como linimetria orbital.

A transição terra-água/água-terra também necessita de aperfeiçoamento do dispositivo flutuador, para minimizar os impactos da agitação da superfície da água e ser ancorado de forma mais eficiente no leito do corpo hídrico.

O método sugerido nesta pesquisa é aplicável para a integração entre referenciais verticais em corpos hídricos continentais ou conectar ilhas ao continente. Os dados lidar ICESat-2 permite realizar o nivelamento hidrográfico com precisão absoluta, em desnível, de aproximadamente 1 cm e precisão relativa em torno de  $4 \text{ mm}/\sqrt{k}$ . Os produtos de altimetria orbital, em conjunto com os métodos de nivelamento terrestre, permitem a aplicação operacional que envolvam a densificação de uma rede altimétrica e nivelamento para fins topográficos para auxílio a trabalhos aplicados a obras de engenharia em geral.

Para trabalhos futuros, o método poderá ser aplicado em corpos de água continentais separados, além de incluir dados da missão SWOT aos dados ICESat-2, sensores altímetros orbitais radar, com frequência de dados de 20 Hz e linímetros/linígrafos para determinar a topografia média da superfície da água (MDT). Quanto aos sensores radar orbitais, poderá ser utilizado o modo *fully-focused SAR*, que aumenta o tempo de integração SAR podendo levar a uma resolução espacial, ao longo da trilha, de até 0,5 m (o SAR tem resolução espacial em torno de 300 m). Além das réguas linimétricas, sensores linigráficos de pressão e radar, nos próximos trabalhos serão incluídas as estações linigráficas que usam a tecnologia GNSS-R terrestre para aumentar a cobertura de estações linimétricas/linigráficas. Também podem ser testados os dados obtidos em outras fontes como o Earthdata da NASA por exemplo, onde há acesso a todas as informações de potência do sinal, de processamento e modelos utilizados que podem ou não levar a melhores opções de tratamento dos dados e resultados.

Serão experimentados outros modelos geoidais globais para a conversão entre altitudes elipsoidais e altitudes ortométricas, já que o MapGeo2015 pode apresentar bom desempenho em algumas regiões e mal desempenho em outras, dependendo da disponibilidade de informações gravimétricas usadas para a interpolação do modelo. Poderá ser aplicado ainda um sistema de altitudes dinâmicas para o complexo Guaíba/Patos, já que se trata de um sistema estreitamente relacionado com o sistema de números geopotenciais e que representa o comportamento do fluxo da água. Além disso, dados de sensores altímetros orbitais também poderiam ser usados

para a determinação do desvio da vertical e utilizá-la como um índice para analisar a precisão da recuperação do campo gravitacional hidrográfico.

Além de se estabelecer as bases para a implantação da RLPPG, aos moldes da RMPPG, poderá ser usado também o posicionamento GNSS em solo para o monitoramento da estabilidade das RRNN ao longo dos anos. Sobre a superfície da água, os conjuntos constituídos de boias e receptores GNSS poderão ser usados para comparar os dados dos satélites altímetros em termos de altitudes elipsoidais, sem a necessidade de usar redes altimétricas e o geóide, o que eliminaria uma fonte de erros sistemáticos (modelo geoidal).

O dispositivo flutuador também será aperfeiçoado. Procurando dar maior estabilidade e confiabilidade será melhorado o sistema de ancoragem e adicionado uma proteção extra contra a oscilação da superfície da água, com função de um poço tranquilizante.

Devido a novidade da aplicação da metodologia proposta, haveria a necessidade de desenvolver normas e especificações técnicas para o nivelamento hidrográfico orbital associado aos métodos terrestres de determinação das diferenças de nível para a integração de referenciais verticais, levando em consideração a duração mínima da medição, distâncias máximas nas conexões água-água (inclusive o ajustamento de trilhas do sensor orbital muito longas sobre a superfície em grandes corpos de água) e terra-água/água-terra, intensidade máxima dos ventos, amplitude da maré, etc.



## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico: procedimentos.** [s.l.] ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 13133: Execução de levantamento topográfico: procedimentos.** [s.l.] ABNT, 2021.
- ABSHIRE, J. B. et al. Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat mission: On-orbit measurement performance. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21, 2005.
- AFRASTEH, Y. et al. The potential impact of hydrodynamic leveling on the quality of the European vertical reference frame. **Journal of Geodesy**, v. 95, n. 8, 2021.
- ALBARICI, F. L. et al. A new perspective for physical heights in Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 1, 2019.
- ALVES, S. DA C.; KRUEGER, C. P.; DALAZOANA, R. Técnica PSInSAR na Avaliação de Deslocamentos: Análise Conceitual, Aplicações e Perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 75, 2023.
- ANDERSEN, N.; GRABOWSKI, J.; REMMER, O. **The hydrostatic levelling across the Fehmarn belt.** Proc. 11th General meeting Nordic Geodetic Commission, Copenhagen. **Anais...1990**
- ANDERSEN, O. B. **The DTU10 Global Gravity field and mean sea surface--improvements in the Arctic.** 2nd IGFS meeting. **Anais...2010**
- ANDERSEN, O. B. et al. Improving the Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Combination of Tide Gauge and Satellite Altimetry. **Marine Geodesy**, v. 41, n. 6, 2018.
- ANDRADE, L. C. DE et al. Lago Guaíba: uma análise histórico-cultural da poluição hídrica em Porto Alegre, RS, Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 2, 2019.
- ANDRADE NETO, J. S. DE et al. Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. **Pesquisas em Geociências**, v. 39, n. 2, 2012.
- AVISO+. **GDR (Geophysical Data Records).** Disponível em: <<https://www.aviso.altimetry.fr/es/data/products/sea-surface-height-products/global/gdr-igdr-and-ogdr.html>>. Acesso em: 4 jan. 2022.
- BATOOL, S. et al. **Introduction to radar scattering application in remote sensing and diagnostics: ReviewAtmosphere**, 2020.
- BERRY, P. A. M. et al. Global inland water monitoring from multi-mission altimetry. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, 2005.

BIAGI, L.; GREC, F. C.; NEGRETTI, M. **Low-Cost GNSS Receivers for Local Monitoring: Experimental Simulation, and Analysis of Displacements Sensors**, 2016.

BIANCAMARIA, S.; LETTENMAIER, D. P.; PAVELSKY, T. M. The SWOT Mission and Its Capabilities for Land Hydrology. **Surveys in Geophysics**, v. 37, n. 2, p. 307–337, 2016.

BKG. **Height datum relations.** Disponível em: <<https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/Projects/HeightDatumRel/height-datum-rel.html>>. Acesso em: 13 maio. 2022.

BLITZKOW, D. et al. Mapgeo2015: O Novo Modelo De Ondulação Geoidal Do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografi a**, v. 68, n. 1808– 0936, 2016.

BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, 1987.

BROCK, J. C. et al. Basis and methods of NASA Airborne Topographic Mapper lidar surveys for coastal studies. **Journal of Coastal Research**, v. 18, n. 1, 2002.

BUFTON, J. L. Laser Altimetry Measurements from Aircraft and Spacecraft. **Proceedings of the IEEE**, v. 77, n. 3, 1989.

BUFTON, J. L. Airborne lidar for profiling of surface topography. **Optical Engineering**, v. 30, n. 1, 1991.

CALLAHAN, P. S. Ionospheric variations affecting altimeter measurements: A brief synopsis. **Marine Geodesy**, v. 8, n. 1–4, 1984.

CALMANT, S.; SEYLER, F.; CRETAUX, J. F. Monitoring Continental Surface Waters by Satellite Altimetry. **Surveys in Geophysics**, v. 29, n. 4, p. 247–269, 2008.

CARRERA-HERNÁNDEZ, J. J. Vertical datum transformation grids for Mexico. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, 2020.

CARTWRIGHT, D. E.; CREASE, J. A comparison of the geodetic reference levels of England and France by means of the sea surface. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 273, n. 1355, 1963.

CARTWRIGHT, D. E.; EDDEN, A. C. Corrected Tables of Tidal Harmonics. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 33, n. 3, 1973.

CARTWRIGHT, D. E.; TAYLER, R. J. New Computations of the Tide-generating Potential. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 23, n. 1, 1971.

CASACA, J. M.; DE MATOS, J. L.; DIAS, J. M. B. **Topografia geral**. [s.l: s.n.].

CHEN, F.; LIU, L.; GUO, F. Sea Surface Height Estimation with Multi-GNSS and Wavelet De-noising. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 2019.

CHRZANOWSKI, A. **Implementation of trigonometric height traversing in geodetic levelling of high precision**. [s.l.] Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick, 1989.

CIPOLLINI, P. et al. **Monitoring Sea Level in the Coastal Zone with Satellite Altimetry and Tide Gauges Surveys in Geophysics**, 2017.

CLARIZIA, M. P. et al. Analysis of GNSS-R delay-Doppler maps from the UK-DMC satellite over the ocean. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 2, 2009.

CNES et al. **Jason-3 Products Handbook**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <[https://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/hdbk\\_j3.pdf](https://www.ospo.noaa.gov/Products/documents/hdbk_j3.pdf)>.

COPERNICUS; EUMETSAT. **Sentinel-3 SRAL Marine User Handbook**. Darmstadt: [s.n.]. Disponível em: <<https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/1564943/Sentinel-3-SRAL-Marine-User-Handbook.pdf>>.

COPERNICUS; EUMETSAT. **Sentinel-3A Product Notice – STM L2 Marine (NRT, STC and NTC)**. Disponível em: <[https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf\\_s3a\\_pn\\_stm\\_l2\\_nrt\\_stc.pdf](https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_s3a_pn_stm_l2_nrt_stc.pdf)>. Acesso em: 4 jan. 2022.

CRÉTAUX, J. F.; BIRKETT, C. Lake studies from satellite radar altimetry. **Comptes Rendus - Geoscience**, v. 338, n. 14–15, p. 1098–1112, 1 nov. 2006.

CRUMRINE, K. C.; PALMER, J. E. HYDROSTATIC LEVEL FOR ELEVATION SURVEYING. **GEOPHYSICS**, v. 16, n. 3, 1951.

DE FREITAS, S. SIRGAS-WGIII activities for unifying height systems in Latin America. **Revis Cartográfica**, v. 91, p. 75–91, 2015.

DENG, X. Satellite Altimetry. In: GRAFAREND, E. (Ed.). . **Encyclopedia of Geodesy**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 1–5.

DESAI, S.; WAHR, J.; BECKLEY, B. Revisiting the pole tide for and from satellite altimetry. **Journal of Geodesy**, v. 89, n. 12, 2015.

DESORTES, C.; OBLIGIS, E.; EYMARD, L. One-dimensional variational retrieval of the wet tropospheric correction for altimetry in coastal regions. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 3 PART 1, 2010.

DIELACHER, A. et al. **The ESA Passive Reflectometry and Dosimetry (Pretty) Mission**. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...2019**

DINARDO, S. **Techniques and Applications for Satellite SAR Altimetry over water, land and ice**. [s.l.] Technische Universität, 2020. v. 56

DINARDO, S. et al. Sentinel-6 MF Poseidon-4 Radar Altimeter In-Flight Calibration and Performances Monitoring. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 60, 2022.

DONLON, C. J. et al. The Copernicus Sentinel-6 mission: Enhanced continuity of satellite sea level measurements from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 258, 2021.

DREWES, H. et al. Scientific Foundations of the SIRGAS Vertical Reference System. In: [s.l: s.n.].

DREWES, H. **Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum - Basic Considerations**. International Association of Geodesy Symposia. **Anais...2009**

ELLMANN, A.; VANÍČEK, P. UNB application of Stokes-Helmert's approach to geoid computation. **Journal of Geodynamics**, v. 43, n. 2, 2007.

EMILIANO, P. C. et al. Fundamentos e comparação de critérios de informação: Akaike and Bayesian. **Revista Brasileira Biomatemática**, v. 27, n. 3, p. 394–411, 2009.

ESA. **CryoSat Mission and Data Description**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/Mission\\_and\\_Data\\_Descrip.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/Cryosat/Mission_and_Data_Descrip.pdf)>.

ESA; CNES. **Radar Altimetry Tutorial & Toolbox**. Disponível em: <<http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/how-altimetry-works/>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

ESPARTEL, L. Curso de topografia. 1965.

EUMETSAT; CLS; AVISO. **Principles of measuring the oceans from space**. Disponível em: <<https://training.eumetsat.int/mod/book/view.php?id=11825&chapterid=423>>. Acesso em: 28 fev. 2022.

EURIQUES, J. F.; KRUEGER, C. P.; VISKI, A. R. Análise das variações das altitudes obtidas com RTK visando o monitoramento de massas de água por meio de plataformas Eulerianas. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 2, 2017.

FABRA, F. et al. **WAVPY: A GNSS-R open source software library for data analysis and simulation**. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). **Anais...2017**

FAGUNDES, M. A. R. et al. An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: design and long-term validation towards sea-level altimetry. **GPS Solutions**, v. 25, n. 2, p. 1–11, 2021.

FALAVIGNA, G. P. et al. Avaliação do modelo geoidal MAPGEO2015 no estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 3, p. 1033–1064, 2018.

FEATHERSTONE, W. E. Software for computing five existing types of deterministically modified integration kernel for gravimetric geoid determination. **Computers & Geosciences**, v. 29, n. 2, p. 183–193, 2003.

FEATHERSTONE, W. E. et al. The first Australian gravimetric quasigeoid model with location-specific uncertainty estimates. **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 2, 2018.

FILMER, M. S. et al. Comparison between geodetic and oceanographic approaches to estimate mean dynamic topography for vertical datum unification: evaluation at Australian tide gauges. **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 12, 2018.

FRAPPART, F. et al. Evaluation of the Performances of Radar and Lidar Altimetry Missions for Water Level Retrievals in Mountainous Environment: The Case of the Swiss Lakes. **Remote Sensing**, v. 13, n. 11, 2021.

FREITAS, S. R. C. DE; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **IGeS Bulletin N**, p. 47–62, 1999.

FU, L.-L.; CAZENAVE, A. Satellite Altimetry and Earth Sciences: A Handbook of Techniques and Applications (Google eBook). **Satellite Altimetry and Earth Sciences A Handbook of Techniques and Applications**, v. 0, 2000.

GARRISON, J. L. et al. GNSS reflectometry for earth remote sensing. **Position, navigation, and timing technologies in the 21st century: integrated satellite navigation, sensor systems, and civil applications**. Wiley, New York, v. 100, 2019.

GARRISON, J. L. et al. **ANALYSES SUPPORTING SNOOPI: A P-BAND REFLECTOMETRY DEMONSTRATION**. IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...2020**

GEMAEL, C. Introdução a Geodésica Geométrica (2 parte). **Curitiba: UFPR,(s. ed)**, 1988.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações de Geodésia**. [s.l: s.n.].

GENS, R.; VAN GENDEREN, J. SAR interferometry - Issues, techniques, applications. **International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS**, v. 17, p. 1803–1835, 1996.

GOMMENGINGER, C. et al. Retracking Altimeter Waveforms Near the Coasts. In: **Coastal Altimetry**. [s.l: s.n.].

GREGORY, J. M. et al. **Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global** *Surveys in Geophysics*, 2019.

GRIPPA, M. et al. Potential of SWOT for Monitoring Water Volumes in Sahelian Ponds and Lakes. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 12, n. 7, p. 2541–2549, 2019.

HAIRE, P. **Did you know that 90% of coastal seas have no tidal data available?** Disponível em: <<https://www.tidetechnical.com/news/90-percent-coastal-sea-have-no-tidal-data-available>>. Acesso em: 1 abr. 2022.

HALL, A. C. et al. Geodetic corrections to Amazon River water level gauges using ICESat altimetry. **Water Resources Research**, v. 48, n. 6, 2012.

HALL, C. D.; CORDEY, R. A. Multistatic scatterometry. **Remote sensing. Proc. IGARSS '88 symposium, Edinburgh, 1988. Vol. 1**, 1988.

HANNAH, J. The Difficulties in Using Tide Gauges to Monitor Long-Term Sea Level Change. **International Federation of Surveyors**, v. XXIV, n. FACING THE CHALLENGE – BUILDING THE CAPACITY, 2010.

HANSSEN, R. F. **Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis (Remote Sensing and Digital Image Processing)**. [s.l.: s.n.].

HOFMANN-WELLENHOF, B.; MORITZ, H. **Physical geodesy**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2006.

HOLDEN, L. D.; LARSON, K. M. Ten years of Lake Taupō surface height estimates using the GNSS interferometric reflectometry. **Journal of Geodesy**, v. 95, n. 7, 2021.

HU, S. Akaike information criterion. **Center for Research in Scientific Computation**, v. 93, p. 42, 2007.

HUANG, J. **Determining Coastal Mean Dynamic Topography by Geodetic Methods** **Geophysical Research Letters**, 2017.

HURST, K.; BILHAM, R. Hydrostatic levels in precision geodesy and crustal deformation measurement. **Journal of Geophysical Research**, v. 91, n. B9, 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015**. Rio de Janeiro: [s.n.].

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro** Rio de Janeiro/IBGE, , 2017. Disponível em: <[https://geofp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas\\_levantamentos\\_geodesicos.pdf](https://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas_levantamentos_geodesicos.pdf)>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais / IBGE, Coordenação de Geodésia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2019.

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: [s.n.].

IDŽANOVIĆ, M.; OPHAUG, V.; ANDERSEN, O. B. The coastal mean dynamic topography in Norway observed by CryoSat-2 and GOCE. **Geophysical Research Letters**, v. 44, n. 11, 2017.

IGAC. **Red de Nivelación**. Disponível em: <<https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/red-de-nivelacion>>. Acesso em: 13 maio. 2022.

IGN. **Introducción - Red de Nivelación Argentina**. Disponível em: <<https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/Nivelacion/Introduccion>>. Acesso em: 13 maio. 2022.

IHDE, J. et al. **Definition and Proposed Realization of the International Height Reference System (IHR)** *Surveys in Geophysics*, 2017.

IMEL, D. A. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON dual-frequency ionosphere correction. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C12, 1994.

INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION. Manual on sea level measurement and interpretation. Volume I - Basic procedures. **Intergovernmental Oceanographic Commission Manuals and Guide**, v. I, 1985.

INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION. **Manual on Sea-level Measurement and Interpretation. Volume II - Emerging technologies**. [s.l: s.n.].

ITRF. **ITRF2020**. Disponível em: <<https://itrf.ign.fr/en/solutions/ITRF2020>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

JAHANMARD, V.; DELPECHE-ELLMANN, N.; ELLMANN, A. Realistic dynamic topography through coupling geoid and hydrodynamic models of the Baltic Sea. **Continental Shelf Research**, v. 222, 2021.

JALES, P. et al. **The new Spire GNSS-R satellite missions and products**. 2020

JANÁK, J. et al. Computation of precise geoid model of Auvergne using current UNB Stokes-Helmert's approach. **Contributions to Geophysics and Geodesy**, v. 47, n. 3, 2017.

JEAN-PIERRE, B.; MICHEL, S. Gravity data validation and outlier detection using L1-norm. **Bulletin d'information-Bureau gravimétrique international**, n. 91, p. 27–32, 2002.

JESSEN, A. Experiments in hydrostatic levelling. **Bulletin Géodésique**, v. 42, n. 3, 1968.

JIANG, L. et al. Influence of local geoid variation on water surface elevation estimates derived from multi-mission altimetry for Lake Namco. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 65–79, 1 fev. 2019.

JING, C. et al. **Sea surface wind speed retrieval from the first Chinese GNSS-R mission: Technique and preliminary results** *Remote Sensing*, 2019.

KARIMI, A. A.; ANDERSEN, O. B.; DENG, X. Mean sea surface and mean dynamic topography determination from Cryosat-2 data around Australia. **Advances in Space Research**, v. 68, n. 2, 2021.

KELLY, K. M.; DENNIS, M. L. Transforming between WGS84 Realizations. **Journal of Surveying Engineering**, v. 148, n. 2, p. 4021031, 2022.

KLEINHERENBRINK, M.; LINDENBERGH, R. C.; DITMAR, P. G. Monitoring of lake level changes on the Tibetan Plateau and Tian Shan by retracking Cryosat SARIn waveforms. **Journal of Hydrology**, v. 521, 2015.

LARSON, K. M. GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. **WIREs Water**, v. 3, n. 6, p. 775–787, 1 nov. 2016.

LENNON, G. W. The evaluation of tide-gauge performance through the Van de Casteele test. **Cah. Oceanogr**, v. 20, p. 867–877, 1968.

LI, W. et al. Lake Level and Surface Topography Measured With Spaceborne GNSS-Reflectometry From CYGNSS Mission: Example for the Lake Qinghai. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 24, 2018.

LI, Z. et al. Analysis of GNSS-R Altimetry for Mapping Ocean Mesoscale Sea Surface Heights Using High-Resolution Model Simulations. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 9, n. 10, p. 4631–4642, 2016.

LIIBUSK, A. **Precise hydrodynamic levelling using pressure gauges with application to improvement of the Estonian National Levelling Network**. [s.l.] Eesti Maaülikool, 2013.

LIN, Y. P. et al. Development of a GNSS buoy for monitoring water surface elevations in estuaries and coastal areas. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 1, 2017.

LLAVERIA, D. et al. Sea ice concentration and sea ice extent mapping with I-band microwave radiometry and gnss-r data from the ffscat mission using neural networks. **Remote Sensing**, v. 13, n. 6, 2021.

LUO, Q. et al. **Tianjin INSAR time series analysis with L- and X-band**. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. **Anais...**2011

MALIK, J. S.; BHATTI, U. I. **Remote sensing of ocean, ice and land surfaces using bistatically reflected GNSS signals from low Earth orbit**. 2015 Fourth International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE). **Anais...**2015

MARINHA DO BRASIL. **Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav-lev-hidro/sondagem-batimetrica>>. Acesso em: 17 ago. 2023.

MARKUS, T. et al. The Ice, Cloud, and land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. **Remote Sensing of Environment**, v. 190, 2017.

MARTIN-NEIRA, M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry. **ESA Journal**, v. 17, n. 4, 1993.

MARTIN-PUIG, C. et al. CryoSat-2: From SAR to LRM (FBR) for quantitative precision comparison over identical sea state. **38th COSPAR Scientific Assembly**, v. 38, p. 5, 2010.

MEIER, E. et al. Hydrostatic levelling systems: Measuring at the system limits. **Journal of Applied Geodesy**, v. 4, n. 2, 2010.



MERTIKAS, S. P.; KOKOLAKIS, C. Satellite Altimetry. In: GUPTA, H. K. (Ed.). . **Encyclopedia of Solid Earth Geophysics**. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 1343–1349.

MIGUEZ, B. M.; TESTUT, L.; WÖPPELMANN, G. The Van de Casteele test revisited: An efficient approach to tide gauge error characterization. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 25, n. 7, 2008.

MILLS, J.; DODD, D. **Ellipsoidally Referenced Surveying for Hydrography**. Helsinki: International Federation of Surveyors, 2014.

MINTOURAKIS, I.; PANOU, G.; PARADISSIS, D. Evaluation of ocean circulation models in the computation of the mean dynamic topography for geodetic applications. Case study in the Greek seas. **Journal of Geodetic Science**, v. 9, n. 1, 2020.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo Navstar-GPS**. [s.l.] Unesp, 2000.

NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER. **The mission and support of ICESat-2 data**. Disponível em: <<https://nsidc.org/news-analyses/news-stories/mission-and-support-icesat-2-data>>.

NGA. **World Geodetic System 1984 (WGS84)**. Disponível em: <<https://earth-info.nga.mil/index.php?dir=wgs84&action=wgs84>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

NICOLODI, J. L.; TOLDO, E. E.; FARINA, L. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments: Guaíba lake (Brazil). **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 61, n. 1, 2013.

NIEVINSKI, F. G. et al. SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. **Journal of Geodesy**, v. 94, n. 8, 2020.

OTOSAKA, I.; SHEPHERD, A.; MCMILLAN, M. Ice Sheet Elevation Change in West Antarctica From Ka-Band Satellite Radar Altimetry. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 22, 2019.

PAULA, C. F. DE. **Comparação de diferentes densidades de pontos em perfilamentos LiDAR aerotransportado para ambiente urbano regular**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 2017.

PLAG, H. P.; PEARLMAN, M. **Global geodetic observing system: Meeting the requirements of a global society on a changing planet in 2020**. [s.l: s.n.].

PRABHUDESAI, R. G. et al. **Integrated Coastal Observation Network (ICON) for real-time monitoring of sea-level, sea-state, and surface-meteorological data**. MTS/IEEE Seattle, OCEANS 2010. **Anais...2010**

PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. **Sistema Cartográfico do Município de Porto Alegre - Manual de Informações e Orientações**. Porto Alegre: [s.n.].

PRÉVOT, E. **Topographie**. [s.l.] Vve. Ch. Dunod, 1900. v. 2

PUGH, D. T. The physics of pneumatic tide gauges. **The International Hydrographic Review**, 1972.

REALE, F. et al. Wave orbital velocity effects on radar Doppler altimeter for sea monitoring. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 6, 2020.

RENSLOW, M. S. **Manual of airborne topographic lidar**. 2012

RODRIGUES, M. H. K. DE C. S. A. DE M.; CRISÓSTOMO, G. J. C. **Marégrafo de Cascais**. Lisboa: [s.n.].

RÜLKE, A. et al. Unification of European height system realizations. **Journal of Geodetic Science**, v. 2, n. 4, 2012.

RUMMEL, R. **Global Unification of Height Systems and GOCE**. (M. G. Sideris, Ed.) Gravity, Geoid and Geodynamics 2000. **Anais...**Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002

SÁNCHEZ, J. L. C.; DE FREITAS, S. R. C. Estudo do sistema vertical de referência do equador no contexto da unificação do datum vertical. **Boletim de Ciências Geodesicas**, v. 22, n. 2, 2016.

SÁNCHEZ, L. **The International Height Reference System (IHRM) and its realisation, the International Height Reference Frame (IHRF)**. Workshop for the Implementation of the GGRF in Latin America. **Anais...**2019

SÁNCHEZ, L. et al. Strategy for the realisation of the International Height Reference System (IHRM). **Journal of Geodesy**, v. 95, n. 3, 2021.

SANTANA, F. R. et al. Cartas Náuticas com Modelos SEP: Evolução Histórica, e Perspectivas para Hidrografia Brasileira. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 0 SE-Artigos de Revisão, p. 1299–1328, 30 dez. 2020.

SANTANA, T. A.; DALAZOANA, R. Integração dos Referenciais Verticais Terrestre e Oceânico: Conceitos Relacionados, Projetos Desenvolvidos e Desafios [Integration of Land and Sea Vertical References: Involved Concepts, Developed Projects and Challenges]. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, p. 345–364, 2020.

SCHARROO, R. et al. Jason continuity of services: continuing the Jason altimeter data records as Copernicus Sentinel-6. **Ocean Science**, v. 12, n. 2, p. 471–479, 2016.

SCHERER, D. et al. ICESat-2 river surface slope (IRIS): A global reach-scale water surface slope dataset. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, 2023.

SCHUTZ, B. E. et al. **Overview of the ICESat mission** **Geophysical Research Letters**, 2005.

SCHWARZ, K. P.; SIDERIS, M. G.; FORSBERG, R. **The use of FFT techniques in physical geodesy** **Geophysical Journal International**, 1990.

SCHWATKE, C. et al. DAHITI - An innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 10, p. 4345–4364, 2015.

SEGANTINE, P.; SILVA, I. **Topografia para engenharia: teoria e prática de geomática**. [s.l.] Elsevier Brasil, 2015. v. 1

SHEN, X. et al. Soil Moisture Retrieval Depth of P- and L-Band Radiometry: Predictions and Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, p. 1–9, 2020.

SHU, S. et al. Evaluation of historic and operational satellite radar altimetry missions for constructing consistent long-term lake water level records. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 25, n. 3, 2021.

SIDERIS, M. G.; SHE, B. BIN. A new, high-resolution geoid for Canada and part of the US by the 1D-FFT method. **Bulletin Géodésique**, v. 69, n. 2, p. 92–108, 1995.

SJOGREN, W. L.; WOLLENHAUPT, W. R. Lunar shape via the Apollo laser altimeter. **Science**, v. 179, n. 4070, 1973.

SLOBBE, D. C. et al. Height system connection between island and mainland using a hydrodynamic model: a case study connecting the Dutch Wadden islands to the Amsterdam ordnance datum (NAP). **Journal of Geodesy**, v. 92, n. 12, 2018.

SLOBBE, D. C.; KLEES, R.; GUNTER, B. C. Realization of a consistent set of vertical reference surfaces in coastal areas. **Journal of Geodesy**, v. 88, n. 6, 2014.

SMITH, D. A. et al. **Towards the Unification of the Vertical Datum Over the North American Continent**. International Association of Geodesy Symposia. **Anais...2013**

SNEDDON, J. Hydrostatic levelling—a review. **Australian Surveyor**, v. 24, n. 2, 1972.

SOPPA, M. A.; SOUZA, R. B. DE; PEZZI, L. P. Variabilidade das anomalias de temperatura da superfície do mar no oceano atlântico sudoeste e sua relação com o fenômeno El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 3, 2011.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

STAMMER, D.; CAZENAVE, A. **Satellite altimetry over oceans and land surfaces**. [s.l: s.n.].

STENSENG, L. et al. **Sea surface retracking and classification of Cryosat-2 altimetry observations in the Arctic Ocean**. AGU Fall Meeting Abstracts. **Anais...2015**

SUN, X. Lidar sensors from space. In: **Comprehensive Remote Sensing**. [s.l: s.n.]. v. 1–9.

TABURET, N. et al. **Copernicus Global Land Operations “Cryosphere and Water” - “CGLOPS-2” - Framework Service Contract N° 199496 (JRC) - PRODUCT USER**

**MANUAL LAKE AND RIVER WATER LEVEL - 300M - VERSION 2.1 - Issue I2.11.**  
[s.l.: s.n.]. Disponível em:  
<[https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS2\\_PUM\\_LakeAndRiverWaterLevel-V2.1\\_I2.11\\_0.pdf](https://land.copernicus.eu/global/sites/cgls.vito.be/files/products/CGLOPS2_PUM_LakeAndRiverWaterLevel-V2.1_I2.11_0.pdf)>.

TOLDO JR, E. et al. Sedimentação de Longo e Curto Período na Lagoa dos Patos, Sul do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, 2006.

TORGE, W. **Geodesy**. [s.l.] W. de Gruyter, 2001.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. [s.l.] de Gruyter, 2012.

TOURAIN, C. et al. Benefits of the Adaptive Algorithm for Retracking Altimeter Nadir Echoes: Results from Simulations and CFOSAT/SWIM Observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 59, n. 12, 2021.

TSAI, Y. F.; LIN, C. T.; JUANG, J. C. Taiwan's GNSS Reflectometry Mission - The FORMOSAT-7 Reflectometry (FS-7R) Mission. **Journal of Aeronautics, Astronautics and Aviation**, v. 50, n. 4, 2018.

VANÍČEK, P. et al. Algunos Aspectos sobre Alturas Ortométricas y Normales. **Revista Cartográfica**, v. 76/77, 2003.

VANICEK, P.; CASTLE, R. O.; BALAZS, E. I. **Geodetic leveling and its applications** *Reviews of Geophysics*, 1980.

VÉRONNEAU, M.; HUANG, J. The canadian geodetic vertical datum of 2013 (CGVD2013). **Geomatica**, v. 70, n. 1, 2016.

VIGNUDELLI, S. et al. **Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone** *Surveys in Geophysics*, 2019.

WAALEWIJN, I. A. Hydrostatic levelling in the netherlands. **Survey Review**, v. 17, n. 132, 1964.

WANG, X. et al. **Earth science applications of ICESat/GLAS** *International Journal of Remote Sensing*, 2011.

WEI, Z.; WU, F.; LIU, G. The BeiDou coordinate system. **Cehui Xuebao/Acta Geodaetica et Cartographica Sinica**, v. 48, n. 7, 2019.

WINGHAM, D. J. et al. **The mean echo and echo cross product from a beamforming interferometric altimeter and their application to elevation measurement**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. **Anais...2004**

WOODWORTH, P. L. et al. **The status of measurement of the Mediterranean mean dynamic topography by geodetic techniques** *Journal of Geodesy*, 2015.

WÖPPELMANN, G.; MARCOS, M. **Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability** *Reviews of Geophysics*, 2016.

WOPPELMANN, G.; PIRAZZOLI, P. A. Tide Gauges. In: SCHWARTZ, M. L. (Ed.). . **Encyclopedia of Coastal Science**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2005. p. 984–986.

WÜBBELMANN, H. Das hydrodynamische Nivellement am Beispiel eines Pegelnetzes am Fehmarn-Belt. **Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover**, n. 176, p. 1–147, 1992.

WUNSCH, C.; STAMMER, D. Atmospheric loading and the oceanic “Inverted barometer” effect. **Reviews of Geophysics**, v. 35, n. 1, 1997.

XU, L. et al. **Spaceborne GNSS-R observation of global lake level: First results from the TechDemoSat-1 mission** *Remote Sensing*, 2019.

YANG, D. L.; ZOU, J. G. Precise levelling in crossing river over 5 km using total station and GNSS. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 2021.

YAPLEE, B. S. et al. Nanosecond Radar Observations of the Ocean Surface From a Stable Platform. **IEEE Transactions on Geoscience Electronics**, v. 9, n. 3, 1971.

YILMAZ, N. Comparison of different height systems. **Geo-Spatial Information Science**, v. 11, n. 3, 2008.

ZAKATOV, P. S. **Curso de geodesia superior** Moscú Editorial Mir, , 1976.

ZAPATA, C. et al. The use of hydrodynamic models in the determination of the chart datum shape in a tropical estuary. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 5, 2019.

ZAVOROTNY, V. U. et al. Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, v. 2, n. 4, p. 8–45, 2014.

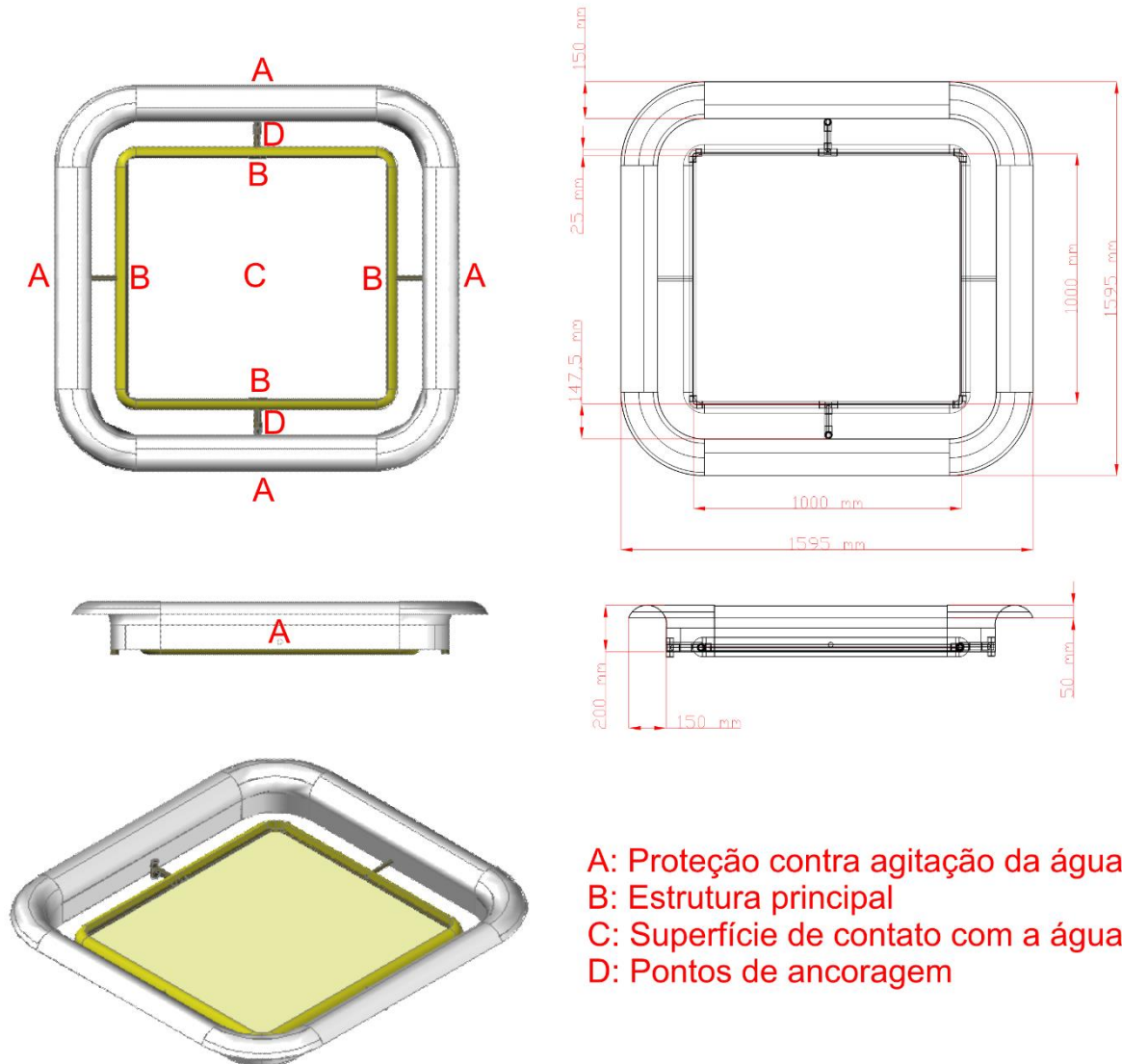
ZELLI, C. ENVISAT RA-2 advanced radar altimeter: instrument design and pre-launch performance assessment review. **Acta Astronautica**, v. 44, n. 7, 1999.

ZWALLY, H. J. et al. ICESat’s laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. **Journal of Geodynamics**, v. 34, n. 3–4, 2002.



## APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS DO DISPOSITIVO FLUTUADOR

### Dispositivo flutuador



#### Última versão usada



- Proteção contra agitação da água em alumínio, com função de “poço tranquilizante”;
- Estrutura principal em tubos de PVC com diâmetro de 25 mm;
- Superfície de contato com a água em tecido impermeável e flexível tipo “blackout”;
- Pontos de ancoragem em PVC com diâmetro de 25 mm.

## ANEXO A – LISTA DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RAAP EM PORTO ALEGRE

ESTAÇÃO	DATA DO LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO	DATA DO CÁLCULO DA ALTITUDE	ALTITUDE NORMAL-ORTOMÉTRICA (m)	ALTITUDE NORMAL (m)	SIGMA DA ALTITUDE (m)
1782R	17/08/1982	15/06/2011	6,3070		0,06
		30/07/2018		6,3338	0,052
1782S	15/10/1982	15/06/2011	5,2982		0,06
		30/07/2018		5,3258	0,052
1782T	18/08/1982	15/06/2011	5,6604		0,06
		30/07/2018		5,6884	0,052
1782U	15/09/1982	15/06/2011	5,0887		0,06
		30/07/2018		5,1171	0,052
1782V	29/09/1982	15/06/2011	3,4385		0,06
		30/07/2018		3,4667	0,052
1782X	29/09/1982	15/06/2011	3,9648		0,06
		30/07/2018		3,9920	0,053
1782Z	29/09/1982	15/06/2011	2,9427		0,06
		30/07/2018		2,9693	0,053
1788A	29/09/1982	15/06/2011	2,9934		0,06
		30/07/2018		3,0196	0,053
1788B	30/09/1982	15/06/2011	3,4425		0,06
		30/07/2018		3,4688	0,053
1788C	30/09/1982	15/06/2011	5,4654		0,06
		30/07/2018		5,4916	0,053
1788D	30/09/1982	15/06/2011	6,0486		0,06
		30/07/2018		6,0749	0,053
1788E	30/09/1982	15/06/2011	6,8485		0,06
		30/07/2018		6,8747	0,053
1788F	15/09/1982	15/06/2011	8,6467		0,06
		30/07/2018		8,6728	0,053
1788G	01/10/1982	15/06/2011	16,0125		0,06
	27/10/2003	30/07/2018		16,0359	0,053
1788H	01/10/1982	15/06/2011	32,8482		0,06
		30/07/2018		32,8780	0,053
1788J	02/10/1982	15/06/2011	81,1880		0,06
		30/07/2018		81,2165	0,053



ESTAÇÃO	DATA DO LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO	DATA DO CÁLCULO DA ALTITUDE	ALTITUDE NORMAL-ORTOMÉTRICA (m)	ALTITUDE NORMAL (m)	SIGMA DA ALTITUDE (m)
1788L	02/10/1982	15/06/2011	45,6005		0,06
		30/07/2018		45,6292	0,053
1788N	02/10/1982	15/06/2011	19,4739		0,06
		30/07/2018		19,5025	0,053
1788P	04/10/1982	15/06/2011	7,4103		0,06
		30/07/2018		7,4388	0,053
1788R	04/10/1982	15/06/2011	4,0712		0,06
		30/07/2018		4,0994	0,052
1788S	05/10/1982	15/06/2011	3,7025		0,06
		30/07/2018		3,7308	0,052
1788T	06/10/1982	15/06/2011	6,2762		0,06
		30/07/2018		6,3048	0,053
3093B	05/11/2003	15/06/2011	20,5356		0,06
		30/07/2018		20,5590	0,054
3093C	05/11/2003	15/06/2011	28,3091		0,06
		30/07/2018		28,3327	0,054
3093D	06/11/2003	15/06/2011	36,8945		0,06
		30/07/2018		36,9182	0,054
3093E	06/11/2003	15/06/2011	39,5849		0,06
		30/07/2018		39,6088	0,054
3093F	06/11/2003	15/06/2011	62,7217		0,06
		30/07/2018		62,7453	0,054
3093H	06/11/2003	15/06/2011	72,1478		0,06
		30/07/2018		72,1713	0,054
3093J	06/11/2003	15/06/2011	73,5415		0,06
		30/07/2018		73,5650	0,054
3093L	06/11/2003	15/06/2011	63,1424		0,06
		30/07/2018		63,1660	0,054
3093M	06/11/2003	15/06/2011	39,5680		0,06
		30/07/2018		39,5922	0,054
3093N	06/11/2003	15/06/2011	42,5274		0,06
		30/07/2018		42,5517	0,054

ESTAÇÃO	DATA DO LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO	DATA DO CÁLCULO DA ALTITUDE	ALTITUDE NORMAL-ORTOMÉTRICA (m)	ALTITUDE NORMAL (m)	SIGMA DA ALTITUDE (m)
1788M	04/10/1982	15/06/2011	38,9521		0,06
		30/07/2018		38,9805	0,053
3093G	06/11/2003	15/06/2011	71,5487		0,06
		30/07/2018		71,5722	0,054
3093N	06/11/2003	15/06/2011	42,5274		0,06
		30/07/2018		42,5517	0,054
3093P	06/11/2003	15/06/2011	28,6959		0,06
		30/07/2018		28,7207	0,054
3093R	05/11/2003	15/06/2011	22,6522		0,06
		30/07/2018		22,6772	0,054
3093S	05/11/2003	15/06/2011	15,9423		0,06
		30/07/2018		15,9678	0,054
3093T	05/11/2003	15/06/2011	8,8869		0,06
		30/07/2018		8,9127	0,053
3093U	05/11/2003	15/06/2011	6,9789		0,06
		30/07/2018		7,0051	0,053

## ANEXO B – LISTA DE REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RAAP EM GUAÍBA

ESTAÇÃO	DATA DO LEVANTAMENTO ALTIMÉTRICO	DATA DO CÁLCULO DA ALTIUDE	ALTITUDE NORMAL-ORTOMÉTRICA (m)	ALTITUDE NORMAL (m)	SIGMA DA ALTITUDE (m)
2101X	25/07/1983	15/06/2011	28,8166		0,06
		30/07/2018		28,8459	
2101Z	25/07/1983	15/06/2011	43,7348		0,06
		30/07/2018		43,7639	
2111B	22/07/1983	15/06/2011	5,7054		0,06
		30/07/2018		5,7351	0,055
2111C	22/07/1983	15/06/2011	11,8073		0,06
		30/07/2018		11,8368	0,055
2111D	22/07/1983	15/06/2011	10,0546		0,06
		30/07/2018		10,0843	0,055
2111E	22/07/1983	15/06/2011	21,1115		0,06
		30/07/2018		21,1411	0,056
2111F	21/07/1983	15/06/2011	16,5296		0,06
		30/07/2018		16,5594	0,056
2111G	21/07/1983	15/06/2011	88,8583		0,06
		30/07/2018		88,8878	0,056
9202F	26/07/1983	15/06/2011	5,9081		0,06
		30/07/2018		5,9378	
9352P	26/04/1985	15/06/2011	11,8487		0,06
		30/07/2018		11,8783	
9352P	26/07/1983	15/06/2011	5,5516		0,06
		30/07/2018		5,5813	
9505E	20/02/1984	15/06/2011	184,4567		0,06
		30/07/2018		184,4855	

## ANEXO C – MONOGRAFIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RAAP USADAS



### Relatório de Estação Geodésica

Estação :	1782Z	Nome da Estação :	1782Z	Tipo :	Referência de Nível - RN
Município :	PORTO ALEGRE			UF :	RS
Última Visita:	29/09/1982	Situação Marco Principal :	BOM	Última Atualização :	30/07/2018

Inscrição chapa :

DADOS PLANIMÉTRICOS	DADOS ALTIMÉTRICOS	DADOS GRAVIMÉTRICOS			
Latitude	30° 01' 20" S	Altitude Normal(m)	2,9693	Gravidade(mGal)	
Longitude	51° 13' 10" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Datum	
Fonte	Carta 1:50000	Sigma Altitude(m)	0,053	Data Medição	
Origem	Transformada	Datum	Imbituba	Data Cálculo	
Datum	SIRGAS2000	Data Medição	29/09/1982		
Data Medição	29/09/1982	Data Cálculo	30/07/2018		
Data Cálculo		Número Geopotencial (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	29,079		
Sigma Latitude(m)					
Sigma Longitude(m)					
UTM(N)	6.678.732				
UTM(E)	478.840				
MC	-51				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - REALT 2018 2ª edição disponível em :

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>

- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em :

[https://geofp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_planimetrica/relatorio/rel\\_sirgas2000.pdf](https://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planimetrica/relatorio/rel_sirgas2000.pdf)

- As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em :

[https://geofp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_referencia/normas/rpr\\_01\\_2015\\_sirgas2000.pdf](https://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf)

#### Localização

A 40m da margem direita da Av. Portuária; 3,0m de um monumento; 46m do Entrepasto Frigorífico do Porto; 50m do Ministério da Agricultura; 0,94km aquém da entrada do prédio do Departamento de Portos, Rios e Canais.

#### Descrição

Marco padrão IBGE.

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.  
A comunicação de falhas, omissões ou o encaminhamento de suas solicitações  
devem ser realizadas oficialmente através da página <https://www.ibge.gov.br/atendimento.html>,  
de maneira que o setor de atendimento envie à área competente para apreciação e resposta.



## Relatório de Estação Geodésica

Estação :	2101Z	Nome da Estação :	2101Z	Tipo :	Referência de Nível - RN
Município :	GUAÍBA			UF :	RS
Última Visita:	25/07/1983	Situação Marco Principal :	BOM	Última Atualização :	01/06/2020

Inscrição chapa :

DADOS PLANIMÉTRICOS		DADOS ALTIMÉTRICOS		DADOS GRAVIMÉTRICOS	
Latitude	30° 06' 40,00" S	Altitude Normal(m)	43,7639	Gravidade(mGal)	
Longitude	51° 19' 05,00" W	Fonte	Nivelamento Geométrico	Datum	
Fonte	Imagem	Sigma Altitude(m)	(#)	Data Medição	
Origem		Datum	Imbituba	Data Cálculo	
Datum	SIRGAS2000	Data Medição	25/07/1983		
Data Medição	07/04/2020	Data Cálculo	30/07/2018		
Data Cálculo		Número Geopotencial (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	428,591		
Sigma Latitude(m)					
Sigma Longitude(m)					
UTM(N)	6.668.860				
UTM(E)	469.358				
MC	-51				

- Ajustamento Altimétrico Simultâneo da Rede Altimétrica em 30/07/2018 - REALT 2018 2ªedição disponível em :

<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101666.pdf>

- Ajustamento Planimétrico SIRGAS2000 em 23/11/2004 e 06/03/2006 - Relatório em :

[https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_sobre\\_posicionamento\\_geodesico/rede\\_planialtimetrica/relatorio/rel\\_sirgas2000.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rede_planialtimetrica/relatorio/rel_sirgas2000.pdf)

- As informações de coordenadas estão relacionadas ao sistema SIRGAS2000, em conformidade com a RPR 01/2015 de 24/02/2015 disponível em :

[https://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/rpr\\_01\\_2015\\_sirgas2000.pdf](https://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf)

### Localização

No pé da coluna direita da Igreja Nossa Senhora do Livramento, na praça do mesmo nome, na parte mais alta da cidade.

### Descrição

Chapa metálica.

(#) Nota :

A Referência de Nível (RN) 2101Z pertence a um ramal, isto é, uma linha de nivelamento geométrico que não forma circuito, cujos desníveis, portanto, não podem ser ajustados. Consequentemente, as respectivas altitudes são calculadas mediante simples transporte, sem as estimativas de desvio-padrão.

Mantenha-se atualizado consultando periodicamente o BDG.  
A comunicação de falhas, omissões ou o encaminhamento de suas solicitações devem ser realizadas oficialmente através da página <https://www.ibge.gov.br/atendimento.html>, de maneira que o setor de atendimento enviará à área competente para apreciação e resposta.

**ANEXO D – MONOGRAFIAS DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL DA RRCM USADAS**

13/10/2023, 11:32

M03

 <p><b>PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE</b> SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos</p>	
<p><b>IDENTIFICAÇÃO DO PONTO</b></p> <p>Nome: M03                  Tipo: Marco Geodésico Principal                  Local: Rótula das Av. Diário de Notícias e Av. Chui                  Endereço: Avenida Diário de Notícias, s/nº                  Datum: SIRGAS2000</p>	
<p><b>COORDENADAS GEODÉSICAS</b></p> <p>Latitude: 30° 4' 51.9029" S                  Longitude: 51° 14' 47.4523" O                  Altitude elipsoidal: 12.17m +/- 0.028m</p>	
<p><b>PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS</b></p> <p><b>TM-POA* (Projeção oficial para Porto Alegre)</b>                  N: 1670889.192m +/- 0.003m                  E: 276234.172m +/- 0.003m</p>	
<p><b>UTM (zona 22 J)</b>                  N: 6672204.197m +/- 0.003m                  E: 476243.5595m +/- 0.003m</p>	
<p><b>DADOS ALTIMÉTRICOS</b></p> <p>Altitude ortométrica: 6.849m +/- 0.0005m                  Informação referenciada à Rede Altimétrica de Alta Precisão do IBGE, ajustamento de 15/06/2011.</p>	
<p><b>OBSERVAÇÕES</b></p> <p>Última visita: 15/4/2013                  Coleta de dados: 2/3/2011                  Pontos intervisíveis: M03A                  Estado: Bom                  Descrição: Marco geodésico padrão IBGE, com chapa de alumínio e parafuso de fixação de equipamento em seu topo.</p>	
<p>*Projeção TM-POA – Transversa de Mercator para Porto Alegre - RS com os seguintes parâmetros: <math>\phi_0=0^\circ</math>   <math>\lambda_0=51^\circ</math>   <math>N_0=5.000.000</math>   <math>E_0=300.000</math>   <math>K_0=0.999995</math>                  Prefeitura Municipal de Porto Alegre – Secretaria Municipal de Urbanismo – Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos – Av. Borges de Medeiros, 2244 – (51)3289-8646</p>	




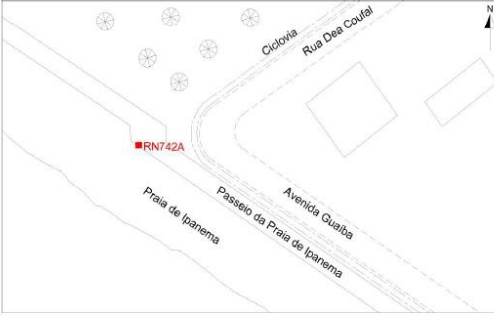

13/10/2023, 11:31

P0617

 <b>PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE</b> SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos	
<b>IDENTIFICAÇÃO DO PONTO</b>	
Nome: P0617	
Tipo: Ponto Topográfico	
Local: Rótula	
Endereço: Rótula da Av. Guaíba e Av. Diário de Notícias	
Datum: SIRGAS2000	
<b>COORDENADAS GEODÉSICAS</b>	
Latitude: $^{\circ} 5' 42.1632''$ S	
Longitude: $51^{\circ} 15' 0.33552''$ O	
Altitude elipsoidal: 10.8196m $\pm$ - 0.0015m	
<b>PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS</b>	
<b>TM-POA* (Projeção oficial para Porto Alegre)</b>	
N: 1669340.7892m $\pm$ - 0.0006m	
E: 275892.5473m $\pm$ - 0.0006m	
<b>UTM (zona 22 J)</b>	
N: 6670656.40616635m $\pm$ - 0.0006m	
E: 475902.069791429m $\pm$ - 0.0006m	
<b>DADOS ALTIMÉTRICOS</b>	
Altitude ortométrica: 5.47954m $\pm$ - 0.00595m	
Informação referenciada à Rede Altimétrica de Alta Precisão do IBGE, ajustamento de 15/06/2011.	
<b>OBSERVAÇÕES</b>	
Última visita: 25/5/2016	
Coleta de dados: 25/5/2016	
Pontos intervisíveis: P0591	
Estado: Bom	
Descrição: Pino de alumínio fixado no meio-fio.	
<small>*Projeção TM-POA – Transversa de Mercator para Porto Alegre - RS com os seguintes parâmetros: <math>\phi_0=0^{\circ}</math>   <math>\lambda_0=51^{\circ}</math>   <math>N_0=5.000.000</math>   <math>E_0=300.000</math>   <math>K_0=0.999995</math>            Prefeitura Municipal de Porto Alegre – Secretaria Municipal de Urbanismo – Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos – Av. Borges de Medeiros, 2244 – (51)3289-8646</small>	


13/10/2023, 11:33

RN742A

 <p><b>PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE</b> SECRETARIA MUNICIPAL DE URBANISMO Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos</p>	
<b>IDENTIFICAÇÃO DO PONTO</b>	
<p>Nome: RN742A                  Tipo: Referência de Nivel                  Local: Avenida Guaíba, sem número                  Endereço: Passeio da Praia de Ipanema                  Datum: SIRGAS2000</p>	
<b>COORDENADAS GEODÉSICAS</b>	
<p>Latitude: 30° 8' 1.861" S                  Longitude: 51° 14' 8.4713" O                  Altitude elipsoidal: 7.67528m +/- 1m</p>	
<b>PROJEÇÕES CARTOGRÁFICAS</b>	
<p><b>TM-POA* (Projeção oficial para Porto Alegre)</b>                  N: 1665042.05m +/- 5m                  E: 277290.15m +/- 5m</p>	
<p><b>UTM (zona 22 J)</b>                  N: 6666359.365m +/- 5m                  E: 477299.1204m +/- 5m</p>	
<b>DADOS ALTIMÉTRICOS</b>	
<p>Altitude ortométrica: 2.67528m +/- 0.00878m                  Informação referenciada à Rede Altimétrica de Alta Precisão do IBGE, ajustamento de 15/06/2011.</p>	
<b>OBSERVAÇÕES</b>	
<p>Última visita: --                  Coleta de dados: 12/1/2011                  Pontos intervisíveis: Nenhum                  Estado: Bom                  Descrição: Localizado no passeio da praia de Ipanema, na altura da esquina da rua Dea Coufal com a Avenida Guaíba.</p>	
	
	
<p><small>*Projeção TM-POA – Transversa de Mercator para Porto Alegre - RS com os seguintes parâmetros: φ0=0°   λ0=51°   N0=5.000.000   E0=300.000   K0=0.999995                  Prefeitura Municipal de Porto Alegre – Secretaria Municipal de Urbanismo – Coordenação de Cartografia e Projetos Geométricos – Av. Borges de Medeiros, 2244 – (51)3289-8646</small></p>	



## ANEXO E – RELATÓRIO DOS LINÍMETROS/LINÍGRAFOS USADOS

FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA						
 ANA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS	Nome da Estação		Município		U.F.	Roteiro
	Cais Mauá C6		Porto Alegre		RS	
	Entidade Operadora		Tipo de Estação		Código ANA	
SEMA/RS		PPrFFrDT		87450004		
Curso d'água			Bacia Hidrográfica		Área de Drenagem	
Canal Navegantes - Lago Guaíba			Bacia Atlântico Sudeste (8)			
DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE MONITORAMENTO						
Item	Tipo de Monitoramento	Data da Instalação	Sigla da Entidade	Data de Desativação	Método de Obtenção	Forma de Transmissão
1	Pluviométrico	25/07/2014	SEMA/RS		Pluviômetro	Telemetria Satélite
2	Fluviométrico	25/07/2014	SEMA/RS		Sensor de pressão	Telemetria Satélite
3	Fluviométrico	10/07/2014	SPH		Réguas	Observador
COORDENADA GEOGRÁFICA DOS TIPOS DE MONITORAMENTO						
Item	Tipo de Monitoramento	Latitude		Longitude		Altitude (m)
1	Pluviométrico	30° 1' 16,27258"		51° 13' 16,81091"		5
2	Fluviométrico	30° 1' 16,27258"		51° 13' 16,81091"		5
3	Fluviométrico	30° 1' 16,27258"		51° 13' 16,81091"		5
EQUIPAMENTOS INSTALADOS						
Equipamento		Marca	Modelo	Autonomia	Ativado em	Desativado em
PCD		VAISALA	MAWS-55M	Bateria/Placa	25/07/2014	
Sensor pressão		KELLER	PAA36XW	Piezoelétrico	29/07/2014	21/07/2015
Sensor radar		SEBA Plus20	Hydrometrie		14/10/2015	
LOCALIZAÇÃO						
A estação localiza-se junto ao cais do porto de Porto Alegre, junto ao armazém C6, em frente à rodoviária da cidade e à margem do canal Navegantes no Lago Guaíba.						
ACESSIBILIDADE						
A estação pode ser acessada pela entrada principal do porto de Porto Alegre à Avenida Mauá e logo após percorrer 1200 metros em direção norte ao longo da linha do cais.						
INFRA-ESTRUTURA EXISTENTE						
POTAMOGRAFIA						
DADOS CADASTRAIS DO OBSERVADOR OU ZELADOR						
Nome:		CPF:	INSS:		Gratificação (R\$):	
PIS/PASEP:		RG:	Órgão Exp.:		Banco:	
Instrução:		Profissão:			Agência:	

Endereço:				C. Bancária:			
Bairro:			CEP:		Cidade:		UF:
Telefones p/ Contato:			( )		Distância da residência à Estação:		
SEÇÃO DE RÉGUAS <small>(SE HOUVER)</small>							
Número de Lances			Descrição dos lances				
Margem			Amplitude (m)		Altitude do Zero da Régua com relação ao nível do mar (m)		Lances instalados
REFERÊNCIAS DE NÍVEL:							
RN	Cota (mm)	Altitude dos RN's com relação ao nível do mar (m)		Estabilidade		Descrição dos RN's	
COTA DE TRANSBORDAMENTO (SEÇÃO DE RÉGUAS) (m)							
MARGEM (ESQUERDA OU DIREITA)				COTA (m)			
SEÇÃO DE MEDIÇÃO							
Distância da Seção de Réguas (m)			Localização			Tipo de Travessia	
Distância PI/PF (m)		Natureza do Leito		Processos de Medição			
LINHA DE BASE							
Alvo 1		Alvo 2		Alvo 3		Alvo 4	
Distância (m)	Ângulo (°)	Distância (m)	Ângulo (°)	Distância (m)	Ângulo (°)	Distância (m)	Ângulo (°)
CARACTERÍSTICAS DO TRECHO (SEÇÃO DE MEDIÇÃO)							
REGIME:		<input type="checkbox"/> Perene	<input type="checkbox"/> Intermitente	<input type="checkbox"/> Efêmero			
CONFORMAÇÃO:		<input type="checkbox"/> Retilíneo	<input type="checkbox"/> Anastomosado	<input type="checkbox"/> Meandrante		<input type="checkbox"/> Curvo	
FUNDO:		<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Irregular				
NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS (SEÇÃO DE MEDIÇÃO)							
MARGEM	NATUREZA		VEGETAÇÃO			INCLINAÇÃO	
CONTROLE (SEÇÃO DE RÉGUAS - JUSANTE)							
TIPO DE CONTROLE				DISTÂNCIA DA SEÇÃO DE RÉGUAS (m)			
POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE							
ESTAÇÃO A MONTANTE (CÓDIGO/ENTIDADE RESPONSÁVEL)				ESTAÇÃO A JUSANTE (CÓDIGO/ENTIDADE RESPONSÁVEL)			

<b>CROQUI DE LOCALIZAÇÃO</b>	
Nome do responsável pela elaboração do croqui de localização	Data

<b>CROQUI DE ACESSO</b>	
<b>PORTO ALEGRE/RS</b>	
<b>OBSERVAÇÕES:</b>	
Nome do responsável pela elaboração do croqui de acesso	Data



**FOTOS DA ESTAÇÃO****OBSERVAÇÕES:**

Nome do responsável que fotografou a estação

Data

## INSTRUÇÕES DE PREENCHIMENTO

### DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE MONITORAMENTO

Descrever todos os tipos de monitoramento presentes na Estação. Exemplo: Pluviométrico, Fluviométrico, Sedimentométrico, Qualidade de Água.

Em *Método de Obtenção*, informar o tipo de equipamento. Exemplo: Pluviômetro, Pluviógrafo, Pluviologger, Régua Linimétrica, Sensor de Pressão, Radar, Linígrafo, USD49 ( para sedimentos), YSI6220V2 (para sondas de qualidade de água), etc.

Em *Formas de Transmissão*, descrever se é com telemetria Satélite, Celular, Boletim ou Datalogger.

### COORDENADA GEOGRÁFICA DOS TIPOS DE MONITORAMENTO

Preliminarmente, deve-se obter as coordenadas de cada tipo de monitoramento utilizando equipamentos GPS de navegação nos seguintes pontos:

Pluviômetro/Pluviógrafo/Pluviologger: Sobre este(s) equipamento(s).

Réguas/Linígrafo/Sedimentométrico: Sobre uma das Referências de Nível.

Sensor de Pressão/Radar: Sobre o Sensor/Radar

Qualidade de água: Sobre o sensor de coleta dos parâmetros de qualidade de água.

### SEÇÃO DE RÉGUAS

*Número de Lances*: Ex: 7

*Descrição dos lances*: Réguas linimétricas de alumínio fixadas em estacas suporte; Réguas linimétricas de acrílico fixadas em estacas suporte; Réguas linimétricas de madeira fixadas em estacas suporte; Réguas linimétricas de alumínio fixadas em estrutura de concreto; Réguas linimétricas de acrílico fixadas em estrutura de concreto; Réguas linimétricas de madeira fixadas em estrutura de concreto; Outros: (especificar)

*Margem*: Esquerda; Direita

*Amplitude*: Será apresentado como: "limite inferior do 1º lance de régua" ao "limite superior do último lance de régua". Ex: 20 m

*Altitude do Zero da Régua com relação ao nível do mar (m)*: Ex: 523,2 m

*Lances instalados*: Apresentar o número lances de réguas instalados.

### REFERÊNCIAS DE NÍVEL

*Descrição dos RN's*: Calota de alumínio chumbada em bloco de concreto; Calota de bronze chumbada em bloco de concreto; Parafuso de ferro chumbado em bloco de concreto; Outros: (especificar)

*Estabilidade*: Boa; Ruim

*Altitude dos RN's com relação ao nível do mar (m)*: Esse valor será igual ao Zero da Régua com relação ao nível do mar (m) + Cota do RN (m)

### SEÇÃO DE MEDIÇÃO

*Distância da Seção de Réguas (m)*: Ex: 200 m

*Localização*: Montante; Jusante

*Tipo de Travessia*: Carro hidrométrico; Barco com cabo de aço ; Barco (GPS); Barco (sextante); Barco (estação total); Barco (teodolito); A vau.

*Natureza do Leito*: Rocha, Cascalho, Areia, Silte, Argila (pode ser marcado mais de um)

*Processos de Medição*: Detalhado; Dois pontos; Três pontos; Método Acústico Doppler; Integrado; Calha Parshall, Vertedouro.

*Distância PI/PF (m)*: Ex: 83 m

### NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS

*Margem*: Esquerda; Direita

*Natureza*: (pode ser informado mais de uma). Ex: Rocha; Cascalho; Areia; Silte; Argila; Outros: (especificar)

*Vegetação*: Sem vegetação; Pequeno porte; Médio porte; Grande porte

*Inclinação*: Pequena; Média; Grande

### CONTROLE

*Tipos de Controle*: Corredeira; Cachoeira; Estreitamento lateral; Canal; Ponte; Bueiro; Degrau; Ilha

### POSICÃO EM RELAÇÃO A REDE

*Estação a montante*: Deve ser informado o código e o nome da entidade responsável pela estação hidrométrica, mais próxima e em operação, localizada imediatamente a montante.

*Estação a jusante*: Deve ser informado o código e o nome da entidade responsável pela estação hidrométrica, mais próxima e em operação, localizada imediatamente a jusante.

### COTA DE TRANSBORDAMENTO

*Margem*: Deve ser informado qual é a margem de transbordamento com a menor cota.

*Cota*: Deve ser informado qual a cota de transbordamento da seção de réguas em metros.

**CROQUI DE LOCALIZAÇÃO**

Deve apresentar um desenho mostrando as principais rodovias de acesso, cidades próximas e algumas informações de distância.

**CROQUI DE ACESSO**

Deve apresentar o croqui da estação contendo a localização da seção de réguas, das referências de nível, seção de medição, pluviômetro, curso d'água, localização de ponte (se houver), etc.

**FOTO DA ESTAÇÃO**

Deve conter uma fotografia recente da estação.



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA



### Identificação

Código:	87460007	Estação:	CRISTAL	Tipo:	F
Região hidrográfica:	Atlântico Trecho			Sub-bacia:	87
Bacia:	LAGOA DOS				
Município:	Porto Alegre	Estado:	RS	Roteiro:	15
Latitude:	-30.0950	Longitude:	-51.2560	Altitude (m):	15
Instrumento:	GPS	Datum:	WGS 84		
Área de dren. (km²):	82800	Instalada em:	01/02/1982	Extinta em:	
Coordenador:	ANA	Operador:	CPRM - SUREG/PA		
Código da folha:	2812	Nome da folha:			
Orgão executor:		Ano:		Escala:	1:100.000

### Localização

- Esta estação localiza-se na sede do late Veleiros do Sul.

### Acessibilidade

- Saindo de Porto Alegre em direção ao bairro Cristal e acessar a avenida Diário de Notícias, ao lado do late Club Cristal.

### Seção de réguas

Margem: Margem esquerda

Réguas:

Réguas 000-300, localizada à 5 metros do RN4.

### Referências de nível

RN04 = 2440mm, localizado a 5m do lance de réguas.

RN05 = 2925mm, localizado a 35m do RN4.



SECRETARIA DE  
GEOLOGIA, MINERAÇÃO  
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA



## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA

### Seções e processos de medição

Estação sem medição.

Processo de medição: Sem Medição

Equipe:

Data: 24/03/2021

Estação: CRISTAL

Código: 87460007

### Potamografia

### Características do trecho

Regime: Perene                      Conformação: Retilínea                      Fundo: Encachoeirado

### Posição em relação à rede

Montante: ILHA DA PINTADA

Jusante:

### Natureza e inclinação das margens

Esquerda: Baixa                      Argilosa com Vegetação de Pequeno Porte

Direita: Baixa                      Argilosa com Vegetação de Pequeno Porte

### Leito

Natureza: Arenosa com Vegetação de Pequeno Porte

### Controle

Controle: Canal                      Localização: - Esta estação                      Distância

### Observador

Nome: Marcelo Carneiro Leite

Apelido:

Endereço: Rua Rocha Pita, 67

Complemento: casa

Bairro: Partenon

Município: Porto Alegre

Estado: Rio Grande do Sul

CEP: 90680-250

Telefone fixo:

Celular:

Autorizado:

Apelido:

Endereço:

Complemento:

Telefone fixo:

Celular:

Leiturista: Marcelo Carneiro Leite





AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA



### Observações

Estação ativa.

### Equipamentos

Apenas réguas linimétricas.

---

Equipe:

Estação: CRISTAL

Data: 24/03/2021

Código: 87460007

---



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA



### Identificação

Código:	87460120	Estação:	IPANEMA	Tipo:	Fr
Região hidrográfica:	Atlântico Trecho			Sub-bacia:	87
Bacia:	LAGOA DOS				
Município:	Porto Alegre	Estado:	RS	Roteiro:	15
Latitude:	-30.1350	Longitude:	-51.2330	Altitude (m):	15
Instrumento:	GPS	Datum:	WGS 84		
Área de dren. (km <sup>2</sup> ):	82900	Instalada em:	01/05/1984	Extinta em:	
Coordenador:	ANA	Operador:	CPRM - SUREG/PA		
Código da folha:	2812	Nome da folha:			
Orgão executor:		Ano:		Escala:	1:100.000

### Localização

- No Lago Guaíba junto a praia de Ipanema em frente à casa do observador, na Av. Guaíba nº 10710.

### Acessibilidade

- Pela Av. Guaíba, esquina com a Av. Flamengo.

### Seção de réguas

Margem: Margem esquerda

Réguas:

Réguas 000-100 e 100-200.

### Referências de nível

RN2 = 3176

RN3 = 2944



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA



### Seções e processos de medição

Estação sem medição.

Processo de medição: Sem Medição

Equipe:

Data: 24/03/2021

Estação: IPANEMA

Código: 87460120

### Potamografia

#### Características do trecho

Regime: Perene

Conformação: Retilínea

Fundo: Regular

#### Posição em relação à rede

Montante: CRISTAL

Jusante:

#### Natureza e inclinação das margens

Esquerda: Baixa

Arenosa Sem Vegetação

Direita: Baixa

Arenosa Sem Vegetação

#### Leito

Natureza: Arenosa com Vegetação de Pequeno Porte

#### Controle

Controle: Canal

Localização: - No Lago Guaíba

Distância

#### Observador

Nome: Bruno Sittoni Gay da Fonseca

Apelido:

Endereço: Av. Guaíba, 476

Complemento: casa

Bairro: Ipanema

Município: Porto Alegre

Estado: Rio Grande do Sul

CEP: 91.760-740

Telefone fixo:

Celular: (51)9-9993-3663

Autorizado:

Apelido:

Endereço:

Complemento:

Telefone fixo:

Celular:

Leiturista: Bruno Sittoni Gay da Fonseca



SECRETARIA DE  
GEOLOGIA, MINERAÇÃO  
E TRANSFORMAÇÃO MINERAL

MINISTÉRIO DE  
MINAS E ENERGIA





AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA



### Observações

- Estação ativa.

### Equipamentos

Réguas linimétricas.

- Linígrafo temporariamente desativado.

---

Equipe:


Estação: IPANEMA

Data: 24/03/2021

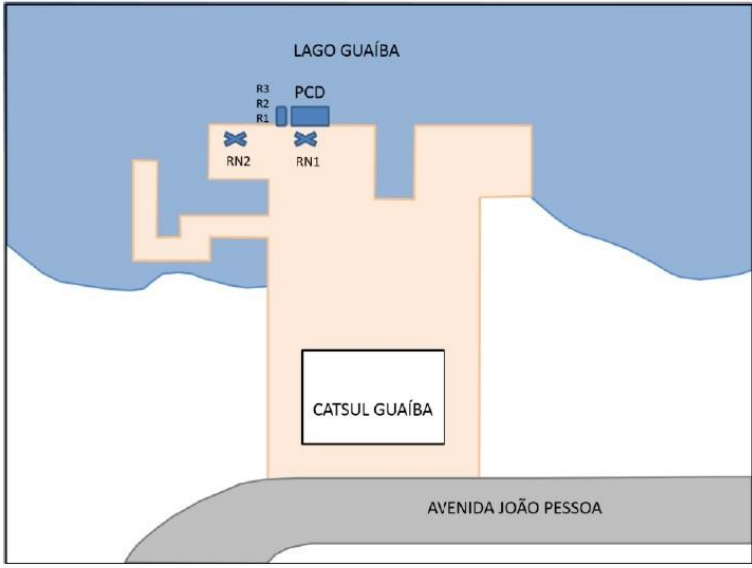
Código: 87460120

---

## FICHA DESCRITIVA DE ESTAÇÃO HIDROMETEOROLÓGICA

 GOVERNO DO ESTADO RIO GRANDE DO SUL	<b>Nome da Estação</b>		<b>Município</b>	<b>U.F.</b>	<b>Roteiro</b>
	CATSUL Guaíba		Guaíba	RS	
	<b>Entidade Proprietária da Estação</b>		<b>Código da Entidade</b>	<b>CNPJ da Empresa</b>	
	Secretaria Estadual do Meio Ambiente				
	<b>Entidade Operadora da Estação</b>		<b>Código PLU</b>	<b>Código FLU</b>	
Água e Solo Estudos e Projetos LTDA.			SEMARG23		
<b>Curso d'água</b>			<b>Bacia Hidrográfica</b>	<b>Área de Drenagem</b>	
Lago Guaíba			Guaíba	-	
<b>DESCRIÇÃO DOS TIPOS DE MONITORAMENTO</b>					
<b>Item</b>	<b>Tipo de Monitoramento</b>	<b>Data da Instalação</b>	<b>Data de Desativação</b>	<b>Método de Obtenção</b>	<b>Forma de Transmissão</b>
1	Fluviométrico	02/04/2019		Plataforma de coleta de dados	Telemetria
2	Pluviométrico	02/04/2019		Pluviômetro	Telemetria
<b>COORDENADA GEOGRÁFICA DOS TIPOS DE MONITORAMENTO</b>					
<b>Item</b>	<b>Tipo de Monitoramento</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude (m)</b>	
1	Fluviométrico	-30.1076	-51.3110		
3	Pluviométrico	-30.1076	-51.3110		
<b>EQUIPAMENTOS INSTALADOS</b>					
<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Modelo</b>	<b>Nº de Série</b>	<b>Ativado em</b>	<b>Desativado em</b>
Caixa de Acondicionamento	PENTAIR Taunus	GSD504020AL	181235	02/04/2019	
Datalogger	Vaisala	QML201C	181235	02/04/2019	
Transmissor GOES com antena GPS	Vaisala	QST102-3	181235	02/04/2019	
Controlador de carga/descarga	MorningSta	SHS-6		02/04/2019	
Bateria (1 unidade)	Unipower	UP12180	181235	02/04/2019	
Sensor de nível submersível	Keller	PAA46X		02/04/2019	
Protetor de surto	Clamper	822.B.020		02/04/2019	
Protetor coaxial Antena (Centelhador)	Penta-watt Eletrônica Ltda			02/04/2019	
Sensor de nível (pressão)	Connetech Electronics Technology Co.,Ltd	CWR7200		02/04/2019	
Membrana de goretex	Gore Technical Venting Solutions	POV/M12 x1,5		02/04/2019	
Painel Solar	KOMAES SOLAR	KMP30	181235	02/04/2019	
Antena GOES	Ideal	Yagi – 401,8 MHz	181235	02/04/2019	
Sensor de precipitação	DualBase	PluviDB	181235	02/04/2019	
Sistema de aterramento		Captor do tipo Franklin		02/04/2019	
<b>LOCALIZAÇÃO</b>					
No píer da CATSUL Guaíba, encontra-se instalado a plataforma de coleta de dados e as escalas limnimétricas.					
<b>ACESSIBILIDADE À ESTAÇÃO DE MONITORAMENTO</b>					
Acesso CATSUL Guaíba na Avenida João Pessoa, 966 – centro, Guaíba. A PCD encontra-se no píer de espera dos usuários do transporte Catamarã.					
<b>INFRA-ESTRUTURA EXISTENTE</b>					

POTAMOGRAFIA (rios afluentes)				
DADOS CADASTRAIS DO OBSERVADOR OU ZELADOR				
Nome:				
Seção de Réguas (SE HOUVER)				
Número de Lances		Descrição dos lances		
3				
Margem	Amplitude (m)	Altitude do Zero da Régua com relação ao nível do mar (m)		Lances instalados
REFERÊNCIAS DE NÍVEL:				
RN	Cota (mm)	Altitude dos RN's com relação ao nível do mar (m)	Estabilidade	Descrição dos RN's
RRNN 1				Chapa de alumínio, fixação química.
RRNN 2				Chapa de alumínio, fixação química.
COTA DE TRANSBORDAMENTO (SEÇÃO DE réguas) (m)				
MARGEM (ESQUERDA OU DIREITA)			COTA (m)	
SEÇÃO DE Medição DE VAZÃO E SEDIMENTO				
Distância da Seção de Réguas (m)		Localização		Tipo de Travessia
Distância P/PPF (m)		Natureza do Leito		Processos de Medição
CARACTERÍSTICAS DO TRECHO (SEÇÃO DE MEDIÇÃO)				
REGIME:	<input type="checkbox"/> Perene	<input type="checkbox"/> Intermitente	<input type="checkbox"/> Efêmero	
CONFORMAÇÃO:	<input type="checkbox"/> Retilíneo	<input type="checkbox"/> Anastomosado	<input type="checkbox"/> Meandrante	<input type="checkbox"/> Curvo
FUNDO:	<input type="checkbox"/> Regular	<input type="checkbox"/> Irregular		
NATUREZA E INCLINAÇÃO DAS MARGENS (SEÇÃO DE MEDIÇÃO)				
MARGEM	NATUREZA	VEGETAÇÃO	INCLINAÇÃO	
CONTROLE (SEÇÃO DE RÉGUAS - JUSANTE)				
TIPO DE CONTROLE			DISTÂNCIA DA SEÇÃO DE RÉGUAS (m)	
POSIÇÃO EM RELAÇÃO À REDE HIDROLÓGICA				
ESTAÇÃO A MONTANTE (CÓDIGO/ENTIDADE RESPONSÁVEL)			ESTAÇÃO A JUSANTE (CÓDIGO/ENTIDADE RESPONSÁVEL)	

CROQUI DE LOCALIZAÇÃO E ACESSO	
 <p>The sketch shows a site layout. At the top is a blue area labeled 'LAGO GUAÍBA'. Below it, a small blue rectangle is labeled 'PCD'. To its left are three small blue squares labeled 'R3', 'R2', and 'R1' stacked vertically. Below these are two blue symbols resembling crossed tools, labeled 'RN2' and 'RN1'. A large orange shape represents the site, with a white box inside labeled 'CATSUL GUAÍBA'. At the bottom is a grey area labeled 'AVENIDA JOÃO PESSOA'.</p>	
Nome do responsável pela elaboração do croqui de localização e de acesso	Data



**IMAGEM DE LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO NO GOOGLE EARTH**



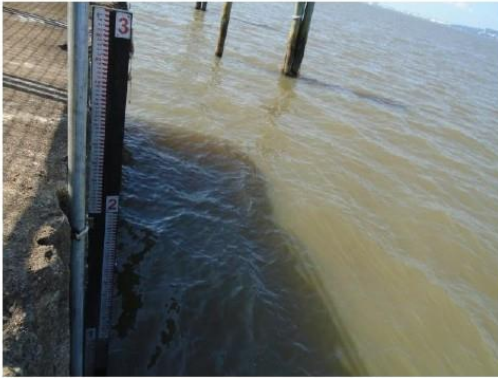
**OBSERVAÇÕES:**

Nome do responsável pela elaboração da imagem	Data



FOTOS DA ESTAÇÃO





**OBSERVAÇÕES:**

Nome do responsável que fotografou a estação	Data