



## Avaliação da Variação Vertical Local Voltada à Integridade de Séries Temporais Maregráficas

### *Assessment of Local Vertical Variation Aimed at the Integrity of Tide Gauge Time Series*

Everton Gomes dos Santos<sup>1</sup>, Salomão Soares<sup>2</sup> e Ivandro Klein<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil. [everton.santos@ibge.gov.br](mailto:everton.santos@ibge.gov.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8730-7755>

<sup>2</sup> Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, Brasil. [salomao.soares@ibge.gov.br](mailto:salomao.soares@ibge.gov.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4826-776X>

<sup>3</sup> Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil. [ivandroklein@gmail.com](mailto:ivandroklein@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4296-592X>

<sup>4</sup> Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Curitiba, Brasil.

Recebido: 06.2022 | Aceito: 10.2022

**Resumo:** As séries temporais maregráficas são fundamentais à integração dos sistemas altimétricos e batimétricos de referência. Logo, é fundamental separar os sinais de origem não oceânica de tais observações. O objetivo desse trabalho é avaliar a variação da movimentação vertical local de regiões que abrigam estações maregráficas considerando aspectos sobre a qualidade da rede de nivelamento e a análise temporal. A rede de nivelamento da Estação Maregráfica de Imbituba (SC) foi avaliada segundo controle de qualidade amplamente utilizado na Geodésia. Assim, foram realizadas as análises dos resíduos, da confiabilidade interna, do número de redundância e do teste global do ajustamento. Para a avaliação da variação vertical das estações geodésicas fez-se classificação preliminar em relação ao tipo construtivo, a magnitude das taxas de variação temporal, da frequência de *outliers* e nível de confiança. Os controles de qualidade aplicados indicaram que a rede comportou-se de forma homogênea e as observações têm precisões melhores do que o esperado. A grande maioria dos resíduos foram inferior a 0,5 mm e as redundâncias parciais classificadas como “suficiente” ( $0,1 \leq r_i \leq 0,3$ ) e “boa” ( $0,3 \leq r_i \leq 1$ ). Os testes globais mostraram que as observações estão melhores que a estabelecida na pré-análise. A variação vertical das estações geodésicas classificadas como A e B apresentaram taxa média de variação vertical de +0,02 mm/ano e nenhum *outlier*; enquanto as estações classe C, após a identificação e separação de *outliers*, 53% da amostra da classe, apresentaram uma taxa média de variação vertical de -0,17 mm/ano, indicando uma característica de recalque. Ficou evidente que o acompanhamento temporal é indispensável às correções para determinação de séries maregráficas integras, livres de influências de origem não oceânica.

**Palavras-chave:** Controle geodésico. Ajustamento de observações. Variação vertical. Redes geodésicas.

**Abstract:** Tide gauge time series are fundamental to integrating height and bathymetric reference systems. Therefore, it is essential to separate signals of non-oceanic origin from such observations. This paper aims to evaluate the local vertical motion variation of regions that host tide gauge stations by considering aspects of the quality of the leveling network and temporal analysis. The leveling network of Imbituba's Tide Gauge Station was evaluated according to quality control widely used in Geodesy. Thus, the following analyses were performed: residuals, internal reliability, redundancy number, and overall model test. For the evaluation of the vertical variation of the geodetic stations, a preliminary classification was made concerning the construction type, the magnitude of the temporal variation rates, outlier detection, and confidence level. The quality control routines applied indicated that the network behaved homogeneously, and the observations had better than expected accuracies. Most residuals were less than 0.5 mm, and partial redundancies were classified as "sufficient" ( $0.1 \leq r_i \leq 0.3$ ) and "good" ( $0.3 \leq r_i \leq 1$ ). The overall model tests showed that the observations are better than the ones established in the pre-analysis. The vertical variation of the geodetic stations classified as A and B showed an average vertical variation rate of +0.02 mm/year and no outlier. In contrast, the class C stations, after the identification and separation of outliers, 53% of the class sample, showed an average vertical variation rate of -0.17 mm/year, indicating a characteristic of settlement. It was evident that temporal monitoring is indispensable to the corrections for determining integral tide gauge series, free of influences of non-oceanic origin.

**Keywords:** Geodetic control. Adjustment of observations. Vertical motion. Geodetic networks.

## 1 INTRODUÇÃO

O controle geodésico de estações maregráficas (CGEM) implantado pelo IBGE (2010) visa detectar e quantificar movimentos verticais de origem não oceânica. Sobretudo, movimentos concernentes à crosta terrestre ou movimentos locais pontuais. Eles podem ocorrer por meio de subsidência ou soerguimento implicando assim em mudanças de posição das estruturas de suporte dos sensores, entre outros aspectos que podem interferir nas observações maregráficas. O CGEM possibilita, principalmente, efetuar as correções necessárias à determinação de uma série integrada da variação do nível do mar. Para isso, deve ser realizado periodicamente a fim de se ter um acompanhamento espaço-temporal fidedigno.

No estabelecimento de uma rede de nivelamento no entorno da estação maregráfica em regiões portuárias, a primeira dificuldade encontrada é identificar locais estáveis para a implantação de referências de nível (RRNN), visto que normalmente os portos são construídos com grande uso da técnica de aterro. Atrelado a essa dificuldade, existem as diversas mudanças cotidianas nos portos que resultam em uma excessiva destruição de RRNN. Dalazoana (2005, p. 65-69) fez um levantamento histórico das RRNN implantadas no Porto de Imbituba (SC) desde 1948, constatando o alto índice de destruição, o que corrobora com essa afirmação quanto a vulnerabilidade dessas implantações em ambientes de características dinâmicas como os portos.

Posto isso, o CGEM (IBGE, 2010) propõe uma condição mínima de instalação de RRNN a fim de garantir a preservação dos resultados oriundos das observações maregráficas e dos rastreios com receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS). A superabundância de estações geodésicas proporciona a condição ideal para uma estrutura altimétrica. De acordo com IBGE (2021) a Estação Maregráfica de Imbituba conta atualmente com 26 RRNN distribuídas entre o Porto de Imbituba (SC) e o centro da cidade.

A atualização das Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE, 2017), contempla as atividades do CGEM, incorporando novas tecnologias, por exemplo, o nível eletrônico, que tornou a atividade mais eficiente e econômica; principalmente para trabalhos que exigem maior rigor e melhor precisão. Vale reforçar que no citado documento é feita uma divisão do nivelamento geométrico científico (NGC) em dois tipos básicos: controle geodésico de estações maregráficas e vinculação entre estações maregráficas. Embora o enfoque desses dois grupos seja voltado para atender às necessidades do CGEM, ambos podem ser aplicados em levantamentos que exijam precisões melhores que a da Rede Altimétrica de Alta Precisão – RAAP, isto é,  $3\text{ mm}\sqrt{D_{km}}$ , sendo D a distância em quilômetros de uma seção. Um exemplo recente foi o estabelecimento da Rede Geodésica de Referência Costeira – RGRC (SANTOS, 2021).

A concepção das redes para o controle, detecção e quantificação dos sinais não oceânicos é feita de forma que possibilite a melhor condição de levantamento das observações em campo mantendo o rigor necessário à vinculação do nível médio do mar ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Além disso, permite a integração dos níveis de referência geodésicos às observações oriundas de outras plataformas, como por exemplo: gravimetria, satélites altímetros e GNSS.

Nesse sentido, o CGEM requer uma infraestrutura física que garanta estabilidade das estações geodésicas a longo prazo. No momento da concepção (materialização) dos circuitos de controle temporal da componente vertical alguns importantes cuidados são tomados. Esses vão desde o material escolhido para a confecção dos dispositivos e das chapas, seu formato e, principalmente, os locais de implantação. Sobre esses últimos, que está diretamente ligado a estrutura física, ainda não existe uma norma brasileira voltada à classificação dos tipos de RRNN conforme tais aspectos. No entanto, alguns autores têm feito recomendações acerca do assunto a fim de melhorar a estabilidade das estações geodésicas implantadas no território brasileiro e internacionalmente.

O documento Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia 2001-2020 (IBGE, 2021) traz algumas diretrizes fundamentais a respeito desses aspectos que servem como subsídio para discussões na presente pesquisa. Ademais, estudos que abordam as questões relativas à variação vertical de RRNN também são discutidos em FNCGG (2011), Hailegeberel et al.(2018) e IBGE (2016).

Tendo em vista que as estações maregráficas são um elemento importante na interface entre as altitudes

(parte terrestre) e profundidades (parte oceânica) e que as redes altimétricas fazem as interlocuções entre as diferentes grandezas, o objetivo deste trabalho é avaliar a variação vertical local voltada à integridade de séries temporais maregráficas, considerando aspectos sobre a qualidade da rede de nivelamento e análise temporal utilizando as medições realizadas na Estação Maregráfica de Imbituba (SC) entre os anos de 2015 e 2022, como exemplo. A aplicação de medidas de confiabilidade (número de redundância, confiabilidade interna entre outras) ao nivelamento geométrico científico endossa os resultados dos ajustamentos de observações que são analisados sobre a ótica temporal agregando, assim, um novo condicionante: a classificação quanto ao local e método construtivo das estações geodésicas. Ou seja, a taxa de variação vertical das RRNN e sua classe são confrontadas e os resultados avaliados. Ressalta-se que a classificação de RRNN baseou-se em experiências internacionais, sendo os resultados dessa pesquisa um possível norteador a contribuir para a atualização do manual de Padronização de Marcos Geodésicos do IBGE (2008).

## **2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE O NIVELAMENTO GEOMÉTRICO CIENTÍFICO, A QUALIDADE DE REDES GEODÉSICAS E A ESTABILIDADE VERTICAL DE ESTAÇÕES GEODÉSICAS**

Nesta seção são abordados conceitos relacionados ao nivelamento geométrico científico, voltado ao controle geodésico de estações maregráficas, bem como alguns indicadores de qualidade, utilizados nos ajustamentos de observações, aplicados ao presente trabalho. Ademais, é feita uma breve explanação sobre aspectos relacionados ao controle da variação vertical em estações geodésicas voltadas à integridade de séries temporais maregráficas.

### **2.1 Nivelamento geométrico científico**

O Nivelamento Geométrico Científico (NGC) consiste na associação dos procedimentos comuns do nivelamento geométrico a procedimentos mais rigorosos de levantamento altimétrico, utilização de instrumentos calibrados e correções sistemáticas compatíveis com exigências da alta precisão (LUZ, 2008, p 69). Nesse sentido, é adotada uma metodologia mais rigorosa com controles e procedimentos específicos que proporcionam valores limites que estejam consoantes ao estabelecido pelas Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE, 2017).

Durante a execução de um nivelamento existe a preocupação em mitigar os chamados erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. As recomendações para diminuir tais erros, assim como a prática do nivelamento geométrico, estão bastante difundidas na literatura especializada. Como exemplos pode-se citar: IBGE (1983, 2017), McCormac (2007), Torge e Muler (2012) entre outras. Para o NGC além das orientações consolidadas, são empregados cuidados adicionais para garantir o rigor exigido. Adotando-se equipamentos como nível digital com precisão de 0,3 mm por quilômetro de duplo nivelamento, tripé não extensível e par de miras de invar não extensíveis. Alguns desses procedimentos são:

- a) comprimentos das visadas aproximadamente equidistantes e não maiores que 30 m – para minimizar o efeito de curvatura, de refração atmosférica e de colimação;
- b) rejeitar leitura das miras inferiores a 0,50 m e superiores a 2,80 m respectivamente – para minimizar os efeitos causados pela reverberação e erro na verticalidade da mira;
- c) leitura da mira na sequência ré, vante, vante, ré (RVVR) – essa condição reduz efeitos provocados pelo afundamento das miras e do nível (recalques diferenciais);
- d) não realizar leituras em diferentes ambientes ao mesmo tempo, sobretudo acima de superfície aquática ou outros fluídos ou, ainda, superfícies especulares (exemplo: asfalto seco e alagado);
- e) evitar o início e o término do levantamento nas primeiras e últimas horas do dia, pois nesses períodos a atmosfera encontra-se perturbada em função do nascer e pôr do Sol;
- f) iniciar e concluir cada seção com a mira mestra – elimina o erro de índice;
- g) adoção da média de cinco leituras consecutivas ininterruptas – traz mais confiabilidade a medição eletrônica, já que cada visada é lida dez vezes (RVVR) e comparadas entre si;
- h) o tempo de ocupação das estações deve ser o mais breve possível, e o local escolhido para

- estacionar o equipamento e as miras deve ser o mais estável possível – evita que possíveis acomodações sofridas pelo instrumental, em decorrência do seu próprio peso, influenciem nos resultados das observações;
- i) o equipamento deve ser protegido da radiação solar direta, utilizando-se um guarda-sol próximo àquele, evitando-se a realização de medições sob condições atmosféricas adversas (chuva, ventos fortes etc.). É recomendável fazer a aclimação do equipamento às condições ambientais antes das medições – evita que a incidência lateral dos raios solares introduza uma defasagem angular na linha de visada;
  - j) sempre realizar colimação do equipamento no início das atividades de medição, e no caso de realizar medições em períodos distintos executar nova colimação;
  - k) observar o cumprimento das diferenças máximas estabelecidas para o levantamento a fim de controlar a coleta das observações – diferença: das medições das duas visadas a ré/vante, do desnível entre medidas consecutivas (ré-vante ~ ré-vante), máxima tolerável entre os comprimentos das visadas de ré e vante acumulada para a seção e por lance e máxima aceitável entre nivelamento e contranivelamento da seção.

As citadas especificações foram facilitadas por meio da adoção de equipamentos eletrônicos, conforme citado anteriormente, pois eles permitem eliminar alguns erros básicos como o armazenamento da leitura e a verificação da verticalidade da mira de invar. Além, de proporcionar controle e organização das informações de maneira fácil e automática. No entanto, alguns fatores atrapalham a execução dos levantamentos, por exemplo, a mira utilizada é composta de código de barras que são lidas pelo nível eletrônico. As vezes pode ocorrer uma distribuição irregular de luminosidade sobre a mira que dificulta ou impossibilita realizar as leituras, acarretando atrasos à medição.

O controle vertical das estações geodésicas no entorno das estações maregráficas exige uma aplicação sistemática do NGC. A RMPG, nesse sentido, segue as recomendações da Comissão Oceanográfica Internacional (COI), que estabelece a precisão de  $1\text{ mm}\sqrt{D_{km}}$  para esse tipo de controle (IOC 2006, p. 31). Tais recomendações são seguidas com algumas adaptações de acordo com IBGE (2010) que após 2015 foram sendo aprimoradas. Resultados preliminares da análise das séries históricas dos ajustamentos dos circuitos de controle de algumas estações maregráficas conseguiram apontar possíveis abalos (provocados pela ação humana ou da estrutura), recalques e soerguimentos (relacionados a movimentação no sentido vertical do solo) das respectivas RRNN na ordem de décimos de milímetros por ano, como descrito em IBGE (2013, p 28-29; 2016, p 21-22).

Um outro exemplo a se levar em evidência sobre a aplicação em larga escala do NGC foi feito no âmbito da Rede Geodésica de Referência Costeira. Nesse trabalho foram empregadas outras adaptações ao NGC, como pode ser visto em Soares, Santos e Luz (2018). Por meio dos métodos utilizados conseguiu-se obter erros de fechamento das seções e circuitos abaixo da tolerância estabelecida, revelando assim a ótima qualidade do levantamento além de confirmar a homogeneidade esperada para a Rede definida na pré-análise (SOARES et al, 2019). Informações complementares sobre a aplicação do NGC e do CGEM podem ser consultadas em IBGE (2010, 2016 e 2021).

## 2.2 Resíduos do ajustamento

O desnível medido entre dois pontos (seção) por meio do nivelamento geométrico não é unívoco, pois depende do trajeto a ser percorrido durante a medição. Isso se deve ao fato das diferentes superfícies equipotenciais não serem paralelas entre si nas posições dos níveis. As linhas de colimação dos níveis, por sua vez, são tangentes a superfície equipotencial do campo de gravidade (DE FREITAS; BLITZKOW, 1999). Além das questões de natureza puramente física existem, durante a prática do nivelamento geométrico, fatores que influenciam na qualidade das observações, como já relatados na seção 2.1. Todos esses fatores podem causar *outliers* e variados erros – de natureza aleatória, sistemática e grosseira – às observações, os quais são largamente abordados pela literatura especializada.

As observações altimétricas coletadas em campo são posteriormente utilizadas para o cálculo de diversos tipos de altitude. Em face disso passam pelo processo de ajustamento de observações, ferramenta

largamente utilizada na ciência geodésica, que busca estimar os valores de determinados parâmetros incógnitos por meio de solução única (COLLISCHONN, KLEIN, MATSUOKA, 2012). Nesse sentido, o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) é uma técnica de otimização que minimiza a soma dos quadrados dos resíduos ponderados tendo como resultados a máxima verossimilhança e mínima variância para os parâmetros estimados quando os dados seguem distribuição normal (GHILANI, 2010). Uma vez realizado o ajustamento, são fornecidas informações que norteiam a análise da confiabilidade e sobretudo no controle de qualidade.

A ponderação dos resíduos consiste nos respectivos pesos das observações que no caso da componente altimétrica, usualmente, utiliza-se o inverso do valor da distância nivelada, em quilômetros. Ao levar em consideração esta perspectiva, é importante ressaltar que dependendo da natureza ou comportamento dos erros aleatórios, o MMQ pode ou não ser o melhor estimador imparcial (KLEIN, 2012). Abordagens alternativas ao ajustamento pelo MMQ em redes altimétricas podem ser obtidas, por exemplo, em Suraci, Oliveira e Klein (2019) ou Suraci e Oliveira (2020).

Considerando tais colocações Gemael, Machado e Wandresen (2015) definem o resíduo ( $v_i$ ) como a diferença entre o valor estimado para uma grandeza e um valor observado desta grandeza. Nesse sentido, nas linhas de nivelamento a qualidade do resultado dos ajustamentos a elas aplicados deve levar em consideração os valores resultantes dos resíduos referentes a cada desnível observado. Diante dessa concepção, a citada qualidade pode ser avaliada por meio da padronização dos resíduos em função das distâncias, isto é: os erros relativos, a fim de estimar as precisões relativas de cada seção de nivelamento (IBGE, 2019).

### 2.3 Confiabilidade Interna

A confiabilidade interna é uma forma de quantificar a menor fração de um determinado erro existente na observação, ou no modelo, na qual é possível com certo nível de probabilidade ser detectado (KUANG, 1996). De acordo com BAARDA (1968) o valor mínimo do erro detectável é estimado estatisticamente pela relação dada pela Eq. (1):

$$\nabla l_{0i} = \frac{\delta_0}{\sqrt{r_i}} \sigma_{li} \quad , (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

em que  $\nabla l_{0i}$  é o valor mínimo do erro detectável,  $l_i$  a observação,  $\delta_0$  o parâmetro de não centralidade do modelo,  $\sigma_{li}$  o desvio padrão da  $i$ -ésima observação e  $r_i$  a redundância parcial desta.

Ao observar a Eq. (1) fica evidente a influência exercida pela redundância parcial na detecção do erro grosseiro, isto é, a influência da geometria da rede sobre o valor mínimo do erro detectável. Outras grandezas que também exercem significativa influência sobre o valor mínimo do erro detectável são: o desvio padrão ( $\sigma_{li}$ ), relacionado à precisão das observações, o nível de significância ( $\alpha$ ) e o poder do teste ( $\gamma$ ), dos quais se obtém o parâmetro de não centralidade do modelo ( $\delta_0$ ) (MORAES, 2001). A Eq. (1) pressupõe que a matriz peso das observações é uma matriz diagonal. Posto que, na prática, o valor da magnitude do erro grosseiro é desconhecido, usualmente é estipulado o valor de  $\alpha$  e de  $\gamma$ . Já o grau de liberdade ( $q$ ) é conhecido (na análise individual de cada observação:  $q = 1$ ). Tendo essas três componentes determinadas, é possível encontrar o parâmetro de não centralidade do modelo correspondente na distribuição qui-quadrado ( $\lambda = \lambda_0$ ), isto é, se obtém  $\lambda_0 = f(\gamma_0, \alpha_0, q)$ , depois, considera-se que na distribuição normal univariada  $\delta_0 = \sqrt{\lambda_0}$  (KLEIN, 2012).

O nível de significância corresponde a taxa de “falsos positivos” (falso alarme), enquanto o poder do teste corresponde a probabilidade de correta detecção do erro. Em geral, adota-se  $\alpha = 0,1\%$  e  $\gamma = 80\%$ , o que resulta em  $\lambda_0=17,075$  para  $q = 1$  – ver, por exemplo, Baarda, (1968); Rofatto, Matsuoka e Klein (2018).

A forma de detectar um erro significativo em uma observação ( $l_i$ ) é analisar a relação entre o valor do erro estimado aderente à observação ( $\nabla l_i$ ) e o valor mínimo do erro detectável, ou seja, se  $\nabla l_i \geq \nabla l_{0i}$  significa que existe um erro na observação (KUANG, 1996). O cálculo do  $\nabla l_i$  é realizado por meio da Eq. (2) que relaciona o resíduo ( $v_i$ ) da observação com a sua redundância parcial ( $r_i$ ).

$$\nabla l_i = \frac{|v_i|}{r_i}, (i = 1, \dots, n) \tag{2}$$

Informações complementares a respeito da medida de confiabilidade interna assim como o parâmetro de não centralidade do modelo podem ser encontrados nas seguintes referências: Baarda (1968), Baarda (1973), Kuang (1996), Moraes (2001), Ghilani (2010) e Klein (2012).

## 2.4 Número de redundância

A redundância de observações em um processo de ajustamento é fundamental para melhora da acurácia dos resultados estimados assim como na detecção de possíveis erros nos modelos ou nas observações, viabilizando o controle de qualidade ao ajustamento (TEUNISSEN, 2006). Nesse sentido, por meio do chamado número de redundância é possível estimar a controlabilidade das observações de uma rede geodésica. Com essa medida consegue-se, portanto, detectar erros grosseiros e *outliers* nas observações, bem como aspectos sobre a geometria da rede (GHILANI 2010, p .441).

O número de redundância é dividido em duas categorias principais: parcial e média. A primeira são os elementos da diagonal principal da matriz **R**, expressa pela Eq. (3), que na prática é a contribuição trazida por cada observação à redundância total do ajustamento (KLEIN, 2012):

$$R = \sum_v P \tag{3}$$

onde:  $\sum_v$  é a matriz de covariâncias do vetor dos resíduos e **P** é a matriz dos pesos das observações. O traço da matriz **R** é o próprio número de redundância total (número de graus de liberdade), expresso por  $r = n - u$ , sendo respectivamente *n* o número de observações e *u* o número de parâmetros do sistema.

Uma gradação do intervalo de controlabilidade de observações das redundâncias parciais (*r<sub>i</sub>*) é apresentado por Mürle e Bill (1984; p. 48) apud Moraes (2001, p. 200) na qual se faz uma classificação a fim de determinar a controlabilidade das observações referente a erros grosseiros. O Quadro 01 apresenta esses intervalos e a classificação quanto a controlabilidade.

Quadro 1: Intervalos para controle de observações.

Intervalo	Controlabilidade
$0 \leq r_i < 0,01$	Não há
$0,01 \leq r_i < 0,1$	Ruim
$0,1 \leq r_i \leq 0,3$	Suficiente
$0,3 \leq r_i < 1$	Boa

Fonte: Mürle E Bill (1984, p. 48) apud Moraes (2001, p 200).

A segunda categoria, isto é, a redundância média ou relativa ( $\bar{r}$ ), é definida como o quociente do traço da matriz **R** pelo número de observações (*n*) expresso pela Eq. (4) (GHILANI, 2010, p. 441). Esse autor sustenta que números de redundância com valores a partir de 0,5 geralmente é suficiente para garantir que uma determinada observação seja considerada confiável.

$$\bar{r} = \frac{\sum_{i=0}^n r_i}{n} = \frac{n - u}{n} \tag{4}$$

Diante das colocações anteriormente mencionadas, Nowak e Odziemczyk (2018) argumentam que a configuração geométrica da rede, referente a um projeto de primeira ordem deve conter o maior número possível de observações redundantes, pois isso vai resultar em um impacto positivo na precisão final da rede. Entretanto, ressalta-se que isso nem sempre é possível de ser atingido no nivelamento geométrico, em função dos altos custos envolvidos ou questões relacionadas a condições geográficas locais. Rofatto, Matsuoka e Klein (2018) também trazem discussões a respeito do planejamento de redes de nivelamento considerando medidas de confiabilidade.

## 2.5 Teste global do ajustamento

O teste global é um indicador de qualidade do ajustamento. Por meio da aplicação desse teste consegue-se indicar a ocorrência de possíveis erros (por exemplo, grosseiros e sistemáticos) no conjunto de observações e até mesmo erros no modelo matemático, ou seja, é verificado se esse modelo está consistente com as observações ou ainda o sistema está mal condicionado (COLLISCHONN et al., 2015).

Aspectos relacionados à qualidade do ajustamento podem ser apontados por meio da comparação da variância de referência *a priori* ( $\sigma_0^2$ ) com a variância de referência *a posteriori* ( $\hat{\sigma}_0^2$ ) (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015, p. 138–139). Os mesmos autores acrescentam que ao se comparar a  $\sigma_0^2$  com a  $\hat{\sigma}_0^2$  e obter uma discrepância significativa a um determinado nível de confiança, indica que existe problemas no ajustamento. Vale destacar que a escolha (arbitrária) de um determinado valor para  $\sigma_0^2$  (exemplo:  $\sigma_0^2 = 1$ ) não ocasiona qualquer efeito no resultado nos valores dos parâmetros estimados.

Considerando tais colocações, uma vez havendo discrepâncias deve-se determinar se elas são significativas ou não. A análise é feita por meio do teste de hipótese baseado na distribuição qui-quadrado ( $\chi^2$ ). Os dois testes possíveis são: o bilateral e o unilateral. Em ambos é calculado o valor de  $\chi^2$  que é dado pela Eq. (5) (KLEIN, 2012):

$$\chi_c^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} v \quad (5)$$

onde  $\chi_c^2$  é o qui-quadrado calculado e  $v$  é o grau de liberdade.

Para o caso do teste bilateral são testadas as hipóteses:

- a) Básica (ou nula)
  - $H_0$ :  $\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$  – as variâncias *a priori* e *a posteriori* não diferem estatisticamente ao nível de significância  $\alpha$ ;
- b) Alternativa
  - $H_1$ :  $\sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$  – as variâncias *a priori* e *a posteriori* diferem estatisticamente ao nível de significância  $\alpha$ .

Se o valor de  $\chi_c^2$  estiver dentro do intervalo de confiança (com probabilidade associada  $1 - \alpha$ ) a hipótese básica não é rejeitada. Essa comparação é feita pela Eq. (6):

$$\chi_{v, \frac{\alpha}{2}}^2 < \chi_c^2 < \chi_{v, 1 - \frac{\alpha}{2}}^2 \quad (6)$$

Nos casos em que a hipótese básica é rejeitada deve-se averiguar as possíveis causas a fim de detectar o que pode estar afetando a qualidade do ajustamento. Gemael, Machado e Wandresen (2015, p. 139) argumentam que tais causas podem ser: a presença de resíduos excessivamente grandes, modelo estocástico não apropriado, sistema mal condicionado, existência de erro de cálculo no processo de ajustamento, modelo funcional não adequado além, de identificar a ocorrência ou não de erros grosseiros e sistemáticos.

## 2.6 Aspectos relacionados a estabilidade vertical

As estações geodésicas implantadas para compor uma rede altimétrica sofrem ao longo do tempo ações que podem ocasionar o deslocamento da referência da estação de modo que a informação materializada é modificada. Dentre essas ações pode-se citar recalques, subsidências, demolições e construções em seu entorno, intemperismo e até mesmo vandalismo. Nessa subseção são abordados conceitos relacionados ao controle da estabilidade vertical, resumizada nos seguintes tópicos: classificação das referências e nível; determinação das taxas de variação temporal; detecção de *outliers* e intervalo de confiança.



## 2.6.1 CLASSIFICAÇÃO DAS REFERÊNCIAS DE NÍVEL

De acordo com Hailegeberel et al. (2018) recentes estudos têm mostrado que quando as estações geodésicas sofrem os efeitos de movimentação provenientes do solo, eles acarretam maiores impactos na componente vertical do que na componente horizontal, posto que, frequentemente, os movimentos do solo estão na direção vertical. Nesse sentido, a fim de diminuir a evidente vulnerabilidade das estações geodésicas à variação das suas posições verticais Luz e Guimarães (2003) recomendam a implantação das citadas estações em locais o mais estáveis possíveis, como substrato rochoso.

A norma de Padronização de Marcos Geodésicos (IBGE, 2008) especifica as diretrizes para construção e materialização de estações geodésicas por meio de chapas cravadas, marcos ou pilares, de forma a garantir sua estabilidade e durabilidade. No entanto, tal norma não classifica a estabilidade dessas estações de acordo com a estrutura construída e o tipo de local de implantação. Uma classificação dessa natureza é encontrada em Hailegeberel et al. (2018) na qual direciona o gerenciamento e a avaliação de riscos de uso de uma rede baseada na estabilidade e suas definições gerais. O Quadro 02 apresenta a citada classificação.

Quadro 2: Classificação e definições gerais de marcos geodésico.

Classe de estabilidade	Definições gerais
A	Mais confiável, espera-se que a altitude seja mantida por longo tempo
B	Provavelmente manterá a altitude por longo tempo
C	Pode manter a altitude por longo tempo, mas sujeita a movimentos de superfície
D	Estabilidade desconhecida ou questionável

Fonte: Adaptado de Hailegeberel et al. (2018).

Resumidamente, as RRNN classe A são exatamente as instaladas em afloramentos rochosos, ou locais de fundações fincadas em rocha. As RRNN classificadas como B são monumentos do tipo haste profunda que alguns países já utilizam há algumas décadas e as instaladas em bases de concreto com fundação. Já as RRNN classificadas como C são marcos de concreto de baixa profundidade. Por fim, as RRNN classificadas como tipo D são marcos ou chapas colocados em calçadas, pavimentos, estruturas leves, acima de tubulações entre outros. A Figura 1 apresenta a exemplificação de estações geodésicas de cada classe citada que podem ser encontradas no Banco de Dados Geodésicos (BDG) do IBGE.

Figura 1 – Exemplo de estações geodésicas de acordo com sua classificação. Na parte superior da figura são mostrados, respectivamente, RN tipo A (chapa metálica medindo 06 cm de diâmetro cravada em rocha) e RN tipo B (marco especial tipo haste profunda com o ponto de referência marcado no centro da haste de aço inoxidável que perfurou o solo até a profundidade de ancoragem de 9,25 m). Na parte inferior da figura são mostradas, respectivamente, RN tipo C (marco construído em concreto fixado ao solo com profundidade média de 100 cm com chapa metálica fixada em seu topo) e RN tipo D (chapa metálica medindo 06 cm de diâmetro cravada na base de concreto de um monumento com fundação desconhecida localizado no canteiro central de uma estrada).



Elaboração: Os autores (2022).



As Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos Associados ao Sistema Geodésico Brasileiro (IBGE, 2017, p. 33), na seção 3.4, recomenda a verificação de abalo para confirmar a posição original das RRNN de acordo como descrito no relatório de estação geodésica disponíveis na página da instituição. A análise temporal tratada em tal norma é fundamental para a qualidade de trabalhos que tenham pontos da RAAP como referência.

Outro mecanismo relevante que diz respeito ao acompanhamento temporal da estabilidade de uma linha de nivelamento pode ser realizado por meio dos chamados “*triplets*” (IGN, 2017) utilizados, por exemplo, na rede altimétrica francesa. Trata-se de um conjunto de três RRNN afastadas umas das outras em no máximo um quilômetro de distância, revisitadas periodicamente com nivelamento geométrico para controlar a estabilidade interna e GNSS para fornecer a estabilidade absoluta. No caso da RMPG, em 2016, foi empregada uma adaptação de tais mecanismos inseridos nos circuitos de controle das estações maregráficas. Procedimento similar também está sendo empregado na RGRC (SOARES; SANTOS; LUZ, 2018). Vale informar que tais procedimentos ainda se encontram em fase de análise e novas adaptações dispendo, portanto, de alguns resultados preliminares acerca tanto da forma de implementação quanto da coleta de observações.

## 2.6.2 DETERMINAÇÃO DAS TAXAS DE VARIAÇÃO TEMPORAL

Para o controle geodésico de estações maregráficas (CGEM) a repetibilidade das medições é essencial à determinação das taxas de variação temporal das RRNN. Com a frequência das medições é possível acompanhar as taxas de soerguimento e subsidência das estações, possibilitando inclusive o acionamento do parceiro portuário sobre locais suscetíveis a movimentações fora do padrão esperado. As taxas são determinadas a partir da regressão linear simples, conforme Eq. (7) (ZERVAS, 2009):

$$x_i = bt_i + a + \epsilon_i \quad (7)$$

onde,  $x_i$  é a variável dependente, ou seja, os desníveis anuais estimados pela reta de regressão,  $b$  é a inclinação da reta de regressão,  $t_i$  é a variável independente que representa o tempo em fração de anos,  $a$  corresponde à interseção da reta de regressão com o eixo dos desníveis e  $\epsilon_i$  representa a estimativa do valor residual, determinado pela diferença entre a variável resposta representado pelo desnível observado ( $x$ ) e a variável resposta estimada pela reta de regressão ( $x_i$ ). A inclinação da reta de regressão utilizada para a determinação da tendência, pode ser expresso conforme a Eq. (8):

$$b = \frac{\sum_i(t_i - T)(x_i - X)}{\sum(t_i - T)^2} \quad (8)$$

na qual  $T$  é a média de  $t_i$  e  $X$  é a média de  $x_i$ .

O erro padrão da tendência ( $s_b$ ) pode ser expresso conforme a Eq. (9) (ZERVAS, 2009):

$$s_b = \frac{\sqrt{\sum(x_i - X)^2 - b \sum(t_i - T)(x_i - X)}}{\sqrt{(n - 2) \sum(t_i - T)^2}} \quad (9)$$

onde  $n$  é o tamanho da amostra representado pelo total de anos de desníveis observados.

## 2.6.3 DETECÇÃO DE *OUTLIERS*

O entendimento do termo *outliers*, no âmbito desta pesquisa, seguirá a visão geral de que numa determinada amostra, trata-se de observações inconsistentes que se destacam do conjunto analisado, divergindo dos padrões esperados. Essas divergências podem carregar informações relevantes que precisam ser analisadas em separado e não meramente tratadas como ruídos comumente associadas a imprecisões (FONSECA, 2011). Este entendimento está de acordo com a definição recente proposta em Rofatto (2020):

“*outlier* é uma observação que se afastou de seu valor mais provável a ponto de não pertencer ao modelo matemático (funcional e estocástico) estipulado”. Ou seja, a rejeição de *outliers* devem incluir a reanálise sem essas observações, que necessitam de uma avaliação posterior, pois podem indicar problemas pontuais críticos.

Existem diversos métodos na literatura especializada para a determinação de *outliers*. Segundo SEO (2006), entre os métodos mais utilizados tem-se: Tukey, desvio padrão e distribuição padrão normalizada (Z score).

O método de Tukey, amplamente conhecido como método do quartil e sua representação gráfica conhecida como *boxplot*, é um método robusto e menos sensível a valores extremos, diferentemente de outros métodos que usam a média e desvio padrão. A partir do interquartil (IQR) que corresponde a diferença interquartis (Eq. 10), determina-se os limites interno inferior (Eq. 11) e superior (Eq. 12).

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (10)$$

$$L_{inf} = Q1 - 1,5 * IQR \quad (11)$$

$$L_{sup} = Q3 + 1,5 * IQR \quad (12)$$

em que:  $Q1$  é o primeiro quartil,  $Q3$  o terceiro quartil,  $IQR$  o interquartil,  $L_{inf}$  limite interno inferior e  $L_{sup}$  limite interno superior.

De acordo com TUKEY (1977), considera-se um possível *outlier* qualquer observação que saia da tolerância fixa de 1,5 das respectivas amplitudes interquartis. Sendo que qualquer observação que esteja além de 3,0 unidades das amplitudes interquartis é considerada um *outlier* extremo. Em termos práticos, no âmbito dessa pesquisa, utiliza-se apenas os limites internos na identificação dos prováveis *outliers*.

O método Desvio Padrão parte do princípio de que o desvio padrão sendo uma medida do grau de dispersão dos valores em relação à média, utiliza-se a Eq. (13) (SEO, 2006) para determinar os limites superior e inferior de uma amostra, em que:  $X$  é a média e  $S$  é o desvio padrão amostral calculado pela raiz quadrada da variância.

$$Limites = X \pm 2 \times S \quad (13)$$

Baseia-se nas características de uma distribuição normal para os quais 95% dos dados aparecem dentro desse intervalo. Qualquer valor fora desses limites são caracterizados como *outliers*. Esse método é sensível a valores extremos, podendo não identificar possíveis *outliers* (SEO, 2006; FONSECA, 2011, TRIPATHY SAXENA; GUPTA, 2013).

Por fim, a Distribuição Normal Padronizada (Zscore) é uma distribuição normal de probabilidades, ou seja, se  $x_i$  segue uma distribuição normal,  $N(\mu, \sigma^2)$ , então  $Z$  segue uma distribuição normal padrão caracterizada por possuir média ( $X$ ) igual a 0 e desvio padrão ( $S$ ) igual a 1. Pode ser descrito como ( $x_i$ ) sendo o resultado dos dados conhecidos, subtraído do valor médio da amostra ( $X$ ), esse resultado é dividido pelo desvio padrão ( $S$ ), conforme Eq. (14). Tripathy, Saxena e Gupta (2013) recomendam considerar como *outliers* valores superiores a  $\pm 2$  para o resultado de  $Z$ .

$$Z = \frac{x_i - X}{S} \quad (14)$$

Ressalta-se que no caso de observações independentes, esse procedimento é similar ao Tau, visto que o desvio padrão é tomado como desconhecido *a priori* (ver, por exemplo, KLEIN, 2012). Para cada método realiza-se um processo iterativo para a detecção e retirada de *outliers* da amostra. Desta maneira, as RRNN com taxas de variação vertical fora dos limites são retiradas e o processo é reanalisado até que não haja *outliers* na série.

### 2.6.4 INTERVALO DE CONFIANÇA

Para amostras pequenas ( $n < 30$ ), não há bons métodos gerais para encontrar intervalos de confiança que conteriam o verdadeiro valor da média populacional. Entretanto, sendo a população aproximadamente normal, a distribuição *t de Student* pode ser usada para esse fim (BEZERRA, 2018). Para uma amostra aleatória pequena colhida de uma população normal cuja média é  $\mu$ , o intervalo de confiança  $100(1-\alpha) \%$  para  $\mu$  é descrito conforme Eq. (15). Em outras palavras, a probabilidade de o Intervalo de Confiança (IC) incluir  $\mu$  é igual  $1 - \alpha$ , denominada nível de confiança. Usualmente, utiliza-se um nível de confiança de 90%, 95% e 99% (FERREIRA, 2005).

$$IC_{1-\alpha}(\mu) = X \pm t_{n-1,\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \tag{15}$$

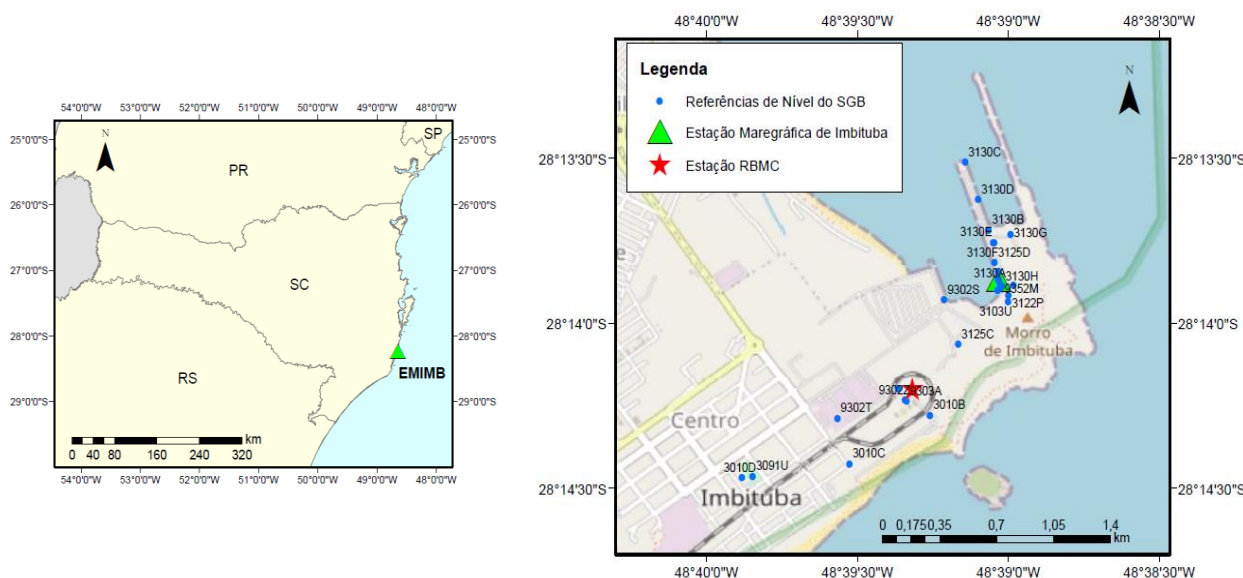
onde  $n$ ,  $X$  e  $S$  representam, respectivamente, o tamanho, a média e o desvio padrão da amostra. O termo  $t_{n-1,\alpha/2}$  é o valor que corta uma área de  $\alpha/2$  na cauda do lado direito da distribuição *t de Student*.

## 3 MÉTODO

### 3.1 Estação Maregráfica de Imbituba

A área de estudo dessa pesquisa compreende a região do Porto de Imbituba, sob administração da SC-Parcerias S/A, e das proximidades além do porto estendendo-se até a Praça Henrique Lage no município de Imbituba (SC). Nas dependências do Porto encontra-se a Estação Maregráfica de Imbituba ( $28^{\circ}13'52,30''S$   $48^{\circ}39'2,06''O$ , SIRGAS2000) operada pela RMPG/IBGE desde 2001. Existe também nesse sítio uma estação da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), que compõe o sistema de monitoramento voltado para o acompanhamento espacial e temporal do *Datum* Vertical Brasileiro de Imbituba – DVB-I. Vale informar que a estação ativa IMBT– 94024 da RBMC foi desativada em abril de 2022 dando lugar a SCIM – 94129. A Figura 2 apresenta a localização da Estação Maregráfica de Imbituba e a extensão espacial das estações geodésicas que compõem o circuito de controle.

Figura 2 – Localização da Estação Maregráfica de Imbituba (SC) e distribuição espacial das RRNN.



Elaboração: Os autores (2022).

A Estação Maregráfica de Imbituba possui a seguinte configuração em relação ao instrumental: Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) digitais, sensores de nível (radar e encoder), régua de maré padrão RMPG, plataforma meteorológica (sensor de velocidade e direção do vento, temperatura, precipitação, umidade relativa do ar e pressão atmosférica) e sistema de transmissão via *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) e telefonia móvel (GSM/GPRS), com taxa de 5 minutos (IBGE, 2021).

Além do acompanhamento das evoluções temporal e espacial do DVB-I, as informações geradas pela Estação Maregráfica de Imbituba permitem estabelecer as relações com os demais níveis de referência utilizados na região costeira, como exemplo os Níveis de Redução (IBGE, 2016). A citada estação, no tocante à RMPG, possui uma série de dados de aproximadamente 20 anos que permite a realização de atividades voltadas ao gerenciamento costeiro, acompanhamento da vulnerabilidade à elevação do nível médio do mar, aos estudos ambientais e ao monitoramento e alerta a eventos extremos, entre outros aspectos (IBGE, 2021).

### 3.2 Insumos e estratégias empregadas

As observações utilizadas na presente pesquisa são oriundas dos levantamentos altimétricos realizados no Porto de Imbituba no âmbito do CGEM pelo IBGE com o emprego das especificações relatadas seção 2.1. Os equipamentos utilizados foram: nível eletrônico Leica modelos DNA-03 e LS-10, miras de invar, tripé rígido e sapatas. O conjunto de dados contempla levantamentos realizados nos anos de 2015 a 2022 com ausência nos anos de 2020 e 2021 devido a pandemia da Covid-19. Após a realização do nivelamento geométrico em campo, foi executado o cálculo do erro de fechamento dos circuitos empregando a tolerância de  $1\text{ mm}\sqrt{D_{km}}$  sendo D a distância nivelada em quilômetros. Em seguida os arquivos foram preparados para os ajustamentos. Nesse caso, foi utilizado o programa *Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data* – GHOST – (CRAYMER, 2017). Tal preparação consiste em reformatar os arquivos de desníveis e coordenadas geodésicas nos quais são calculados e introduzidas ponderações nas observações a serem ajustadas pelo MMQ.

O esquemático do circuito da Estação Maregráfica de Imbituba pode ser visto na Figura 3 (IBGE, 2021). Vale pontuar que alguns anos apresentam configurações de levantamentos diferentes, seja por ampliação da rede, seja em decorrência de aspectos climáticos. Também não estão contemplados nessas pesquisas as observações referentes aos sensores maregráficos e à régua de maré.

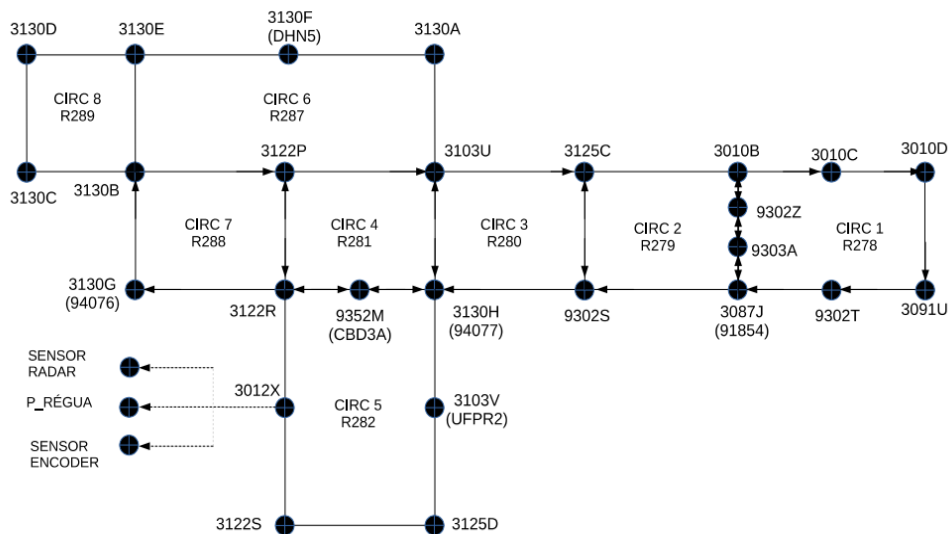
Foi realizado uma pré-análise para escolha da RN de referência para o ajustamento. As RRNN escolhidas preliminarmente para referência como inunção mínima e absoluta (individualmente) para o ajustamento paramétrico seguiram a classificação de estabilidade de Hailegeberel et al. (2018), isto é, classe A (3122R e 3103U) e classe B (3087J). Assim, foi realizado um ajustamento por vez para cada referência considerada. Essa premissa foi utilizada para avaliar a concordância referente aos valores resultantes. As RRNN classe A concordaram entre si, e determinou-se a RN 3122R como referência principal. A altitude utilizada nas inunções únicas foi de valor igual a 0 m. Desta maneira, é possível analisar os resultados no mesmo plano, ou seja, as altitudes finais são os próprios desníveis de cada seção. Satisfeitas as condições iniciais foram executados os ajustamentos referentes a cada ano utilizando o MMQ.

De posse dos resultados obtidos nos ajustamentos primeiramente foi realizado um controle de qualidade prévio das observações por meio da análise dos resíduos padronizados, em seguida foram tabulados os valores obtidos do valor mínimo do erro detectável – Eq. (1) – e do erro estimado aderente à cada observação – Eq. (2) – a fim de determinar a confiabilidade interna. Os números de redundância resultantes foram organizados em intervalos de controle de acordo com Quadro 1 e o cálculo da redundância média para cada ajustamento foi executado utilizando a Eq. (6). A indicação da qualidade dos ajustamentos foi feita utilizando o teste global, bilateral, com nível de significância de 5%.

Satisfeitas as etapas de controle de qualidade das observações, foi então realizada a etapa de organização das informações e análise da variação vertical temporal das estações geodésicas contempladas nos circuitos da Estação Maregráfica de Imbituba. Para tanto, foi aplicada uma classificação preliminar das estações geodésicas, conforme Quadro 2, e calculada a taxa de variação temporal por meio da inclinação da reta de regressão utilizada para a determinação da tendência, conforme Eq. (8). Em seguida, utilizou-se três métodos clássicos de determinação de *outliers* (subseção 2.6.3) para posterior análise, finalizando com o

intervalo de confiança como emprego do nível de confiança de 95% para as classes A, B e C utilizando a Eq. (15).

Figura 3 – Esquema dos circuitos de nivelamento da Estação Maregráfica de Imbituba (SC)



Fonte: IBGE (2021).

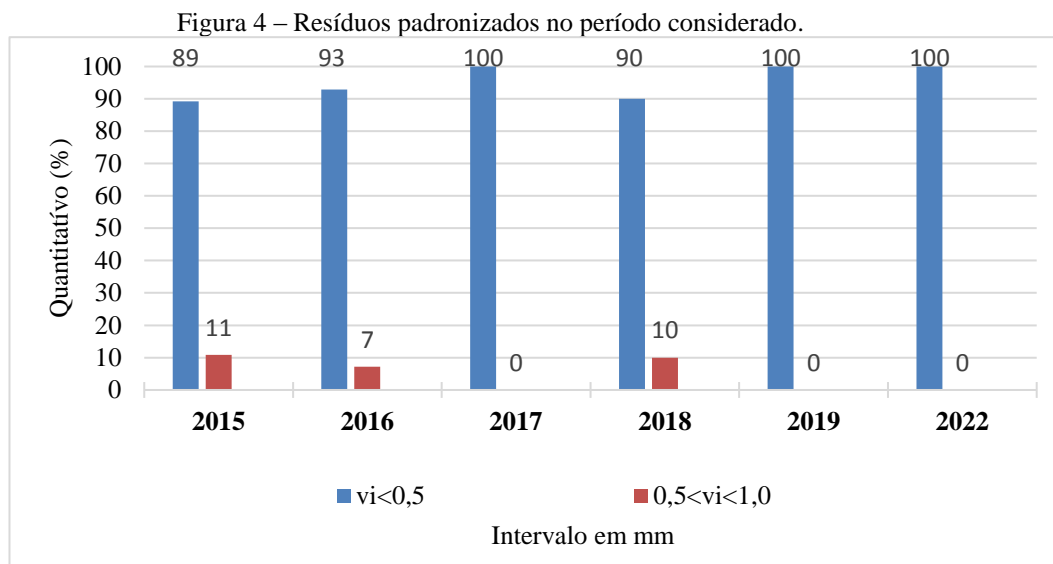
## 4 RESULTADOS E DISCUSÃO

Nesta seção são apresentadas as análises: dos resíduos, da confiabilidade interna, do número de redundância, do teste global e, por fim, da variação vertical temporal.

### 4.1 Análise dos resíduos

Os valores dos resíduos de cada desnível observado é o indicativo fundamental para a determinação instantânea sobre a ocorrência de um determinado erro associado a uma seção de nivelamento. Isto é, são verificadas as diferenças entre os valores observados e estimados. Para a análise em questão os resíduos foram padronizados em função do comprimento das distâncias de cada seção, pois assim, fez-se a relativização dos erros relacionados a cada observação. Em seguida esses resíduos padronizados foram comparados com a tolerância, no caso  $1\text{ mm}\sqrt{D_{km}}$ , não podendo ser superior a essa.

A Figura 4 apresenta o resumo dos resíduos padronizados obtidos nos ajustamentos. Foram categorizados em dois intervalos otimizados para facilitar o entendimento. São mostrados ainda na Tabela 1 a média, o desvio padrão, o máximo, o mínimo e a amplitude dos valores obtidos.



Elaboração: Os autores (2022).

Tabela 1 – Estatística dos resíduos padronizados.

Estatística	Ano do levantamento					
	2015	2016	2017	2018	2019	2022
Tamanho	37	42	30	30	35	32
Mínimo (mm)	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03
Máximo (mm)	0,85	0,57	0,37	0,56	0,46	0,46
Amplitude (mm)	0,85	0,56	0,36	0,54	0,46	0,43
Média (mm)	0,18	0,23	0,10	0,18	0,08	0,16
Desvio padrão (mm)	0,20	0,15	0,08	0,17	0,08	0,12

Elaboração: Os autores (2022).

Pelo exame da Tabela 1 e da Figura 4 fica evidente que a grande maioria dos resíduos estão situados abaixo de 0,5 mm e os demais estão no intervalo de 0,5 a 1 mm. A menor média dos resíduos é referente ao levantamento do ano de 2019 (0,08 mm) e a maior é referente ao do ano de 2016 (0,23 mm). De modo geral os resíduos padronizados apresentaram um comportamento homogêneo mostrando que as linhas analisadas não indicam a ocorrência de inconsistências que influenciem significativamente o resultado dos ajustamentos. A vantagem da análise dos resíduos padronizados é fazer um diagnóstico prévio de como a linha de nivelamento está sendo afetada por um possível erro ou um *outlier* em determinada observação. No entanto, deve-se ter os devidos cuidados na etapa prévia de depuração dos dados a fim detectar inconsistências importantes que podem distorcer os resultados desnecessariamente.

#### 4.2 Análise da confiabilidade interna

A confiabilidade interna de uma observação está diretamente relacionada com o módulo do menor erro detectável dessa observação uma vez estipulados os níveis de probabilidade. Ao realizar a comparação entre o valor do erro estimado aderente à observação ( $\nabla l_i$ ) e o valor mínimo do erro detectável, ( $\nabla l_{0i}$ ) é possível indicar se existe erro significativo em uma observação ( $l_i$ ), conforme descrito na seção 2.2.

Nesse sentido, a Tabela 2 apresenta o resumo das estatísticas dos respectivos valores máximos, médios e mínimos de  $\nabla l_i$  e  $\nabla l_{0i}$  de cada conjunto de observações para os ajustamentos referentes a cada ano.

Tabela 2–Valores máximos, médios e mínimos do menor erro detectável nas observações para cada ajustamento.

Ajustamento/ano	Menor erro detectável (mm) ( $\alpha_0 = 0,1\%$ , $\gamma_0 = 80\%$ , $\delta_0 = 4,13$ )						Aceitação
	Máximo		Médio		Mínimo		
	$\nabla l_{0i}$	$\nabla l_i$	$\nabla l_{0i}$	$\nabla l_i$	$\nabla l_{0i}$	$\nabla l_i$	
2015	6,53	0,78	3,63	0,33	0,99	0,00	sim
2016	6,54	1,54	3,01	0,41	0,58	0,01	sim
2017	6,68	0,28	3,95	0,18	1,58	0,01	sim
2018	7,30	0,99	4,08	0,34	1,95	0,07	sim
2019	6,67	0,45	3,95	0,14	1,56	0,00	sim
2022	6,60	1,36	3,49	0,37	0,58	0,01	sim

Elaboração: Os autores (2022).

Dessa forma nota-se que em 2018 tem-se o maior valor esperado de  $\nabla l_{0i}$  para máximo, médio e mínimo e em 2016 é observado o oposto. De maneira geral não é observada existência de diferenças significativas em cada classe de valores referente a cada ajustamento, ou seja, existe homogeneidade nas observações. Ao considerar a magnitude dos valores médios de  $\nabla l_{0i}$  esses são superiores de sete a dez vezes aos valores de  $\nabla l_i$ . Isso mostra que as observações têm precisões acima do esperado e que não apresentam erros significativos. Sendo assim, as medições de todas as épocas foram aceitas na comparação.

### 4.3 Análise da redundância

A Tabela 3 apresenta os resultados do número de redundância parcial e redundância média referentes ao ajustamento para cada levantamento realizado em um respectivo ano do CGEM.

A classificação proposta por Mürle e Bill (1984, p. 48) apud Moraes (2001, p. 200) para os intervalos de controle de observações, tocantes aos números de redundância, expressa a confiabilidade das observações constantes em cada levantamento realizado. Esses números de redundância fornecem a indicação da porção do possível erro não aleatório que é refletida no resíduo daquela observação.

Os resultados obtidos mostraram que a injeção utilizada não afeta a redundância parcial. Ao analisar os ajustamentos referentes a cada ano observa-se que, de modo geral, apresentam números de redundância parcial classificados como “suficiente” e “boa” (aproximadamente 80%). O ajustamento que apresenta melhor resultado no intervalo anteriormente citado é o do ano de 2016 (90%) e o pior é o do ano de 2017 (74%). No entanto, todos os ajustamentos indicam valores de redundância parcial predominantemente nos intervalos de controlabilidade que denotam melhor capacidade para identificar possíveis erros relacionado às redes de controle.

Apesar dos resultados indicarem que a maioria dos circuitos de controle possuem números de redundâncias que atendem ao propósito do CGEM, cabe pontuar a importância do grau de liberdade: dado que esse tem influência direta no fator de variância *a posteriori*. Quanto maior ele for melhor será a redundância da rede. Em vista disso, os levantamentos que apresentaram maior quantidade de valores na classificação “suficiente” do que na classificação “boa” apontam para a necessidade de aumentar o grau de liberdade das observações e, desta maneira, proporcionar uma análise mais rigorosa do conjunto de observações utilizado nos ajustamentos dos circuitos de controle. Contudo, isso só é válido para novos levantamentos já que o objetivo do CGEM é detectar as variações temporais das coordenadas verticais. Essa indicação pode ser facilmente confirmada quando se observa os números de redundância média, os quais estão abaixo do recomendado por Ghilani (2010, p. 455) para que aquela observação seja considerada confiável, isto é, 0,5.



Tabela 3 – Número de redundância parcial para a estação de referência no período considerado.

Referência	Ajustamento (ano)	Classificação				Redundância média
		Não há $0 \leq r_i < 0,01$	Ruim $0,01 \leq r_i < 0,1$	Suficiente $0,1 \leq r_i < 0,3$	Boa $0,3 \leq r_i < 1$	
3122R	2015	0	8	10	19	0,41
	2016	0	4	9	29	0,46
	2017	1	7	13	9	0,26
	2018	0	7	12	11	0,26
	2019	2	7	13	13	0,28
	2022	1	4	14	13	0,31
	Total	4	37	71	94	

Elaboração: Os autores (2022).

#### 4.4 Análise da qualidade dos ajustamentos

Por meio da comparação da variância *a priori* com a variância *a posteriori* é possível indicar a qualidade do ajustamento e, por conseguinte, testar as hipóteses nula e alternativa. Nesse trabalho foi realizado o teste global para cada ajustamento, referente a cada ano do CGEM, com nível de significância de 5%, isto é, 95% de confiança, para o teste bilateral.

A Tabela 4 traz os valores resultantes dos ajustamentos, o valor calculado do qui-quadrado, os intervalos de confiança e a aceitação ou não da hipótese nula.

Como pode ser visto na referida tabela fica evidenciado que apenas o ajustamento do ano de 2018 passou no teste de hipótese. No entanto, para 2018 e os outros anos estudados observar-se que o valor da variância *a posteriori* é aproximadamente cinco vezes menor que o da variância *a priori*. Isso significa que os resíduos estão melhores do que o esperado, como constatado na seção 4.1. Assim, os testes acerca da aceitação da hipótese nula falham em sua maioria. No entanto, vale enfatizar que não há problemas nos ajustamentos executados (em termos de resíduos elevados), apenas as precisões adotadas *a priori* para as observações estão subestimadas.

Tabela 4 – Resultado do teste global bilateral

Ajustamento (ano)	$\sigma_0^2$	$\hat{\sigma}_0^2$	Grau de liberdade	$\chi^2$	Intervalo de confiança (1 - $\alpha$ = 95%)		Aceitação da hipótese nula
2015	1	0,19	14	2,68	5,63	26,12	não
2016	1	0,18	18	3,23	8,23	31,53	não
2017	1	0,07	7	0,49	1,69	16,01	não
2018	1	0,27	7	1,89	1,69	16,01	sim
2019	1	0,05	9	0,45	2,70	19,02	não
2022	1	0,14	9	1,29	2,70	19,02	não

Elaboração: Os autores (2022).

#### 4.5 Análise da variação vertical temporal

A determinação da variação vertical analisada nessa pesquisa foi realizada por meio da regressão linear simples. Assim, foram determinadas as taxas de variação para o período considerado. Os valores foram reduzidos a uma única referência para facilitar a visualização gráfica. Na Tabela 5 estão os resultados da variação vertical em relação a uma referência arbitrada de valor 0 mm para o ano 2015, ou seja, quanto se variou nos outros anos em relação ao ano de 2015. Essa redução foi inserida para facilitar o entendimento dos gráficos que serão apresentados a seguir. Adicionalmente, tem-se a taxa de variação em mm/ano de cada RN, o erro padrão em mm/ano, o nível de significância valor P (“*p value*”) e uma classificação preliminar das classes de RRNN, considerando seu tipo construtivo descrito no BDG do IBGE, que compõem os circuitos de controle da estação maregráfica em relação ao Quadro 2.

Tabela 5 – Variação vertical reduzida das referências de nível no período.

RN	Classe	Variação vertical reduzida das referências de nível (mm)						Taxa de variação (mm/ano)	Erro padrão (mm/ano)	Valor P
		2015	2016	2017	2018	2019	2022			
3010B	C	0,00	0,50	0,80	0,50	0,70	0,60	0,06	0,05	0,28
3010C	C	0,00	0,20	0,20	-0,20	-0,30	-0,90	-0,15	0,03	0,01
3010D	C	0,00	-0,20	-0,20	-0,60	-0,60	-1,00	-0,14	0,02	0,00
3091U	C	0,00	0,00	-0,20	-1,00	-0,50	-1,10	-0,17	0,05	0,03
9302T	C	0,00	0,80	0,10	-0,50	-0,70	-2,30	-0,39	0,08	0,01
3103U	A	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,01	0,01	0,24
9303A	C	0,00	0,60	0,60	-0,10	-0,10	-0,60	-0,14	0,06	0,10
9302Z	C	0,00	0,60	0,60	-0,40	-0,10	-0,90	-0,18	0,08	0,08
3125C	B	0,00	0,20	0,10	-0,40	0,10	0,20	0,01	0,04	0,77
9302S	C	0,00	0,30	-0,80	-2,60	-2,40	-3,30	-0,55	0,13	0,01
9352M	C	0,00	-0,90	-2,20	-4,50	-5,00	-8,30	-1,22	0,09	0,00
3122P	B	0,00	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,01	0,01	0,24
3087J	B	0,00	0,90	0,80	0,20	0,50	0,30	-0,02	0,07	0,85
3103V	C	0,00	0,40	0,00	-0,50	-0,30	-0,90	-0,16	0,04	0,02
3125D	B	0,00	0,70	0,50	0,60	1,00	0,40	0,04	0,06	0,57
3122S	B	0,00	0,90	0,50	0,90	1,10	0,30	0,02	0,08	0,82
3012X	B	0,00	0,70	0,20	0,70	1,30	0,50	0,07	0,08	0,43
3130A	C	0,00	1,50	1,90	1,40	2,30	3,90	0,48	0,09	0,01
3130F	C	0,00	-1,40	-3,20	-13,00	-15,30	-	-4,22	0,83	0,01
3130B	B	0,00	-0,30	0,00	-0,50	-0,30	-0,20	-0,02	0,04	0,57
3130C	C	0,00	0,10	-	-	0,70	-	0,18	0,02	0,07
3130D	C	0,00	-0,70	-	-	-6,70	-	-1,75	0,26	0,09
3130E	C	0,00	-0,10	-0,20	-3,30	-2,40	-4,50	-0,71	0,16	0,01
3130G	C	-	0,00	0,00	-0,90	-0,50	-1,30	-0,22	0,06	0,05
3130H	C	-	-	0,00	-1,00	-0,50	-1,30	-0,21	0,12	0,22

Elaboração: Os autores (2022).

Os resultados preliminares da série temporal indicam que a incerteza em relação a observação em várias RRNN, independente da classe, é alta retornando uma insignificância estatística para a taxa de variação estimada, principalmente quando das classes mais elevadas, isto é, A e B. Por outro lado, RRNN identificadas como *outliers* apresentaram taxas de variação significativas, em sua maioria. Uma série temporal mais longa poderá fornecer subsídios mais qualificados, uma vez que quanto maior o número de dados menor deve ser o erro padrão.

A Figura 5 apresenta uma amostra de RN de cada classe, onde se evidencia a estabilidade de RRNN classe A. Apesar do período investigativo ser curto a estação 3122S apresenta uma tendência suave de soerguimento com taxa de 0,02 mm/ano. A RN 3091U possui uma taxa de variação vertical idêntica a média da Classe C de -0,17mm/ano, auxiliando na visualização gráfica do recalque médio dessa classe.

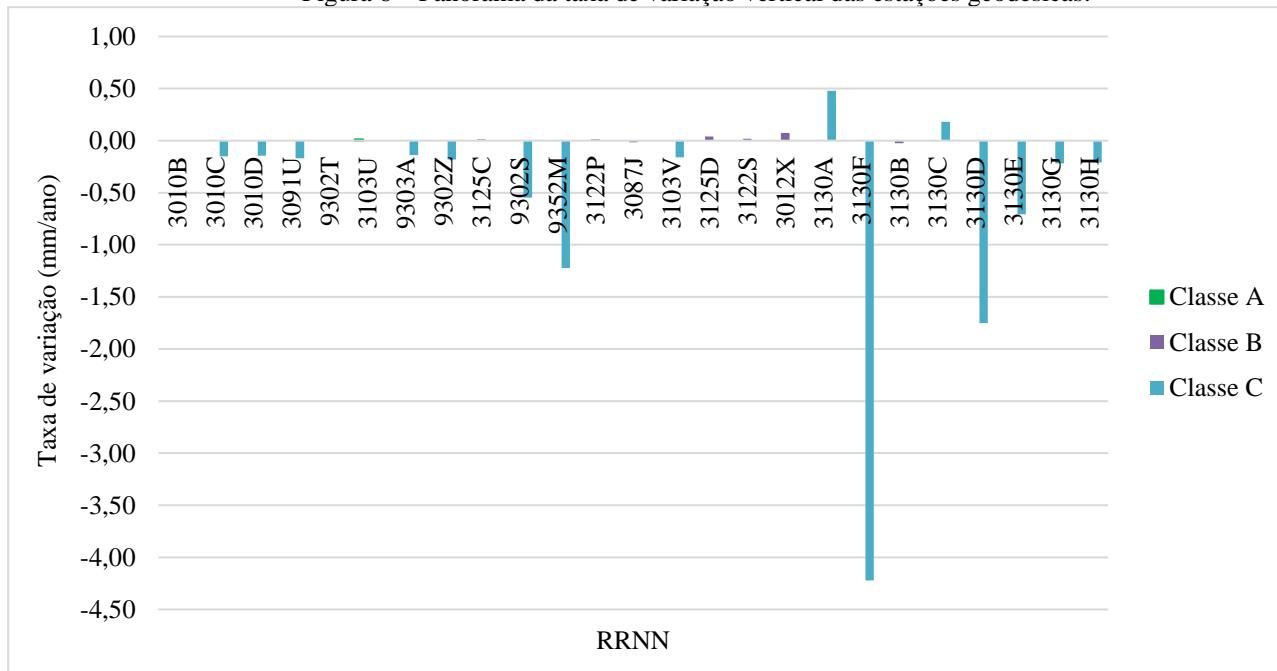
Figura 5 – Variação vertical reduzida de exemplares de referências de nível de cada classe na Estação Maregráfica de Imbituba (SC) no período



Elaboração: Os autores (2022)

A Figura 6 apresenta a visualização gráfica das taxas de variação vertical das RRNN. Conforme pode ser verificado, existe uma diferença significativa entre as classes A e B em relação a classe C. Sendo assim, foi necessário analisar a classe C separadamente das outras classes a fim de minimizar a influência da tendência dessa classe, que poderia ocultar ou gerar falsos *outliers*.

Figura 6 – Panorama da taxa de variação vertical das estações geodésicas.



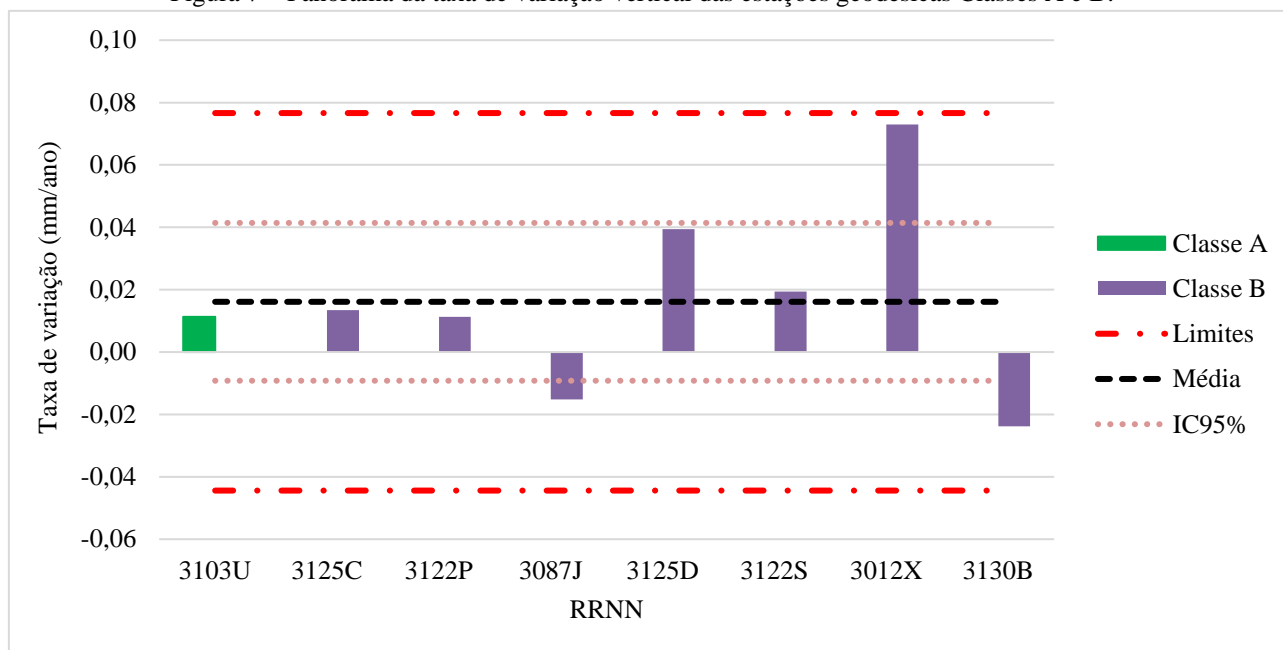
Elaboração: Os autores (2022).

Em vista da necessidade de realizar a análise da classe C em separado e a partir da taxa de variação vertical calculada para cada RN, iniciou-se o processo iterativo para detecção de *outliers*. Posto isso, foram utilizados os três métodos de detecção descritos na subseção 2.6.3. Após a remoção das RRNN classe C ficou constatado que, para as classes A e B, todos os métodos concordaram entre si, não sendo identificado, portanto, nenhum valor como *outlier*.

Na Figura 7 está a representação gráfica da análise da taxa de variação vertical das RRNN classificadas

como A e B, utilizando-se os limites do método Desvio Padrão e Intervalo de Confiança de 95%.

Figura 7 – Panorama da taxa de variação vertical das estações geodésicas Classes A e B.



Elaboração: Os autores (2022).

Apesar das classes apontarem comportamento semelhantes dentro do Intervalo de Confiança estabelecido, percebe-se que, no conjunto amostral, 75% das RRNN têm tendência de soerguimento a despeito da média ser de aproximadamente 0,02 mm/ano. Evidencia-se que as taxas de variação vertical das RRNN classes A e B são compatíveis entre si. Considerando essa colocação, a RN 3103U, com taxa de variação de 0,01 mm/ano, confirma a qualidade de RRNN fixadas em afloramentos rochosos, se consolidando como melhores opções quando disponíveis, por outro lado RRNN em locais com boas fundações também se apresentaram adequadas e tendem a manter a altitude por longos períodos como o caso das RRNN classe B 3125C e 3122P que têm taxa de variação vertical similar à da RN 3103U.

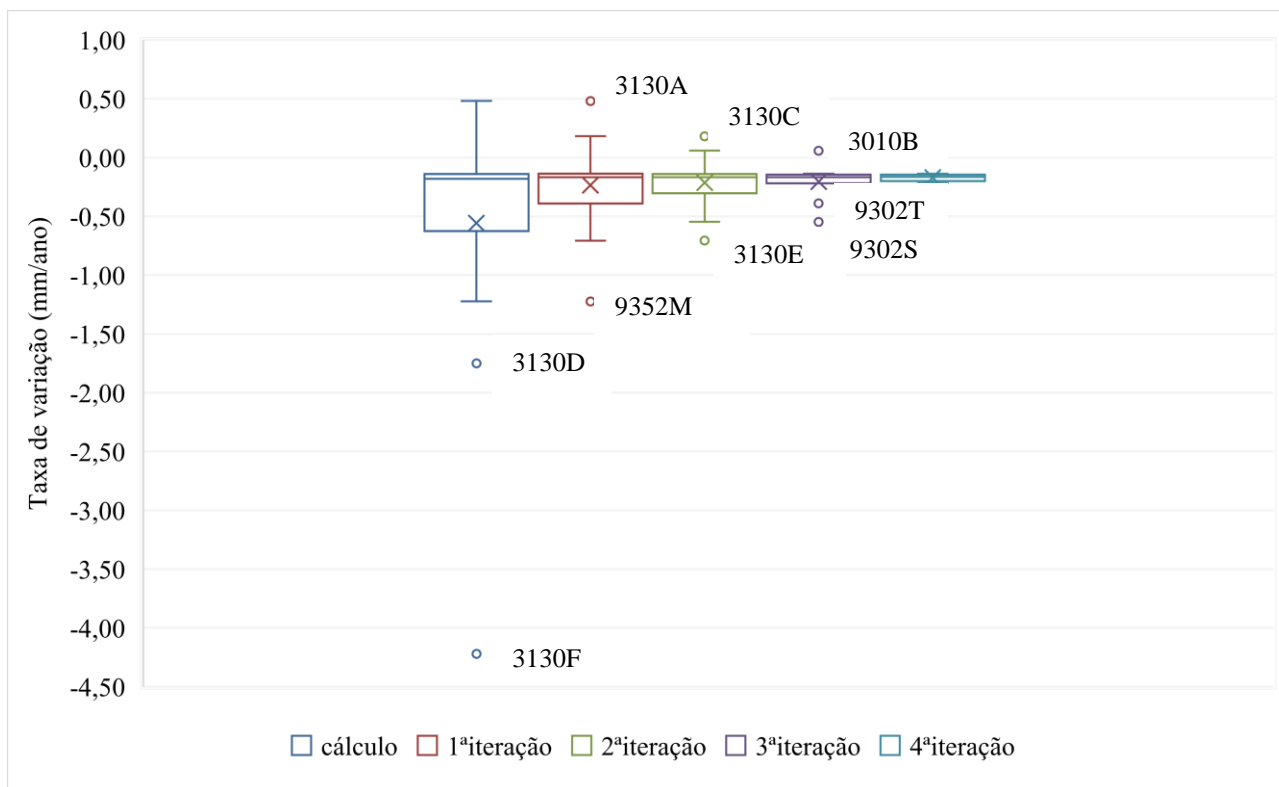
Seguindo adiante, em relação a classe C, no início do processo iterativo para detecção de *outliers* havia 17 RRNN classificadas preliminarmente nessa classe. Os resultados do processo utilizando os 3 métodos de detecção de *outliers* estão resumidos na Tabela 6. Verifica-se que todos os métodos identificaram a mesma quantidade de *outliers*. Entretanto, o método Tukey (mostrado na Figura 8) apresentou-se o mais ágil, necessitando de apenas 4 iterações após o cálculo inicial para atingir os mesmos resultados que os demais métodos. As RRNN ora identificadas como *outliers* serão analisadas posteriormente, em separado.

Tabela 6 – Estatística das iterações para detecção de *outlier*.

Classe	Método	Quantidade de iterações	Quantidade de outliers	RRNN outliers identificadas
C	Tukey	4	9	3130F, 3130D, 9352M, 3130A, 3130E, 3130C, 9302S 3010B e 9302T
	Desvio Padrão	7	9	
	Zscore	8	9	

Elaboração: Os autores (2022).

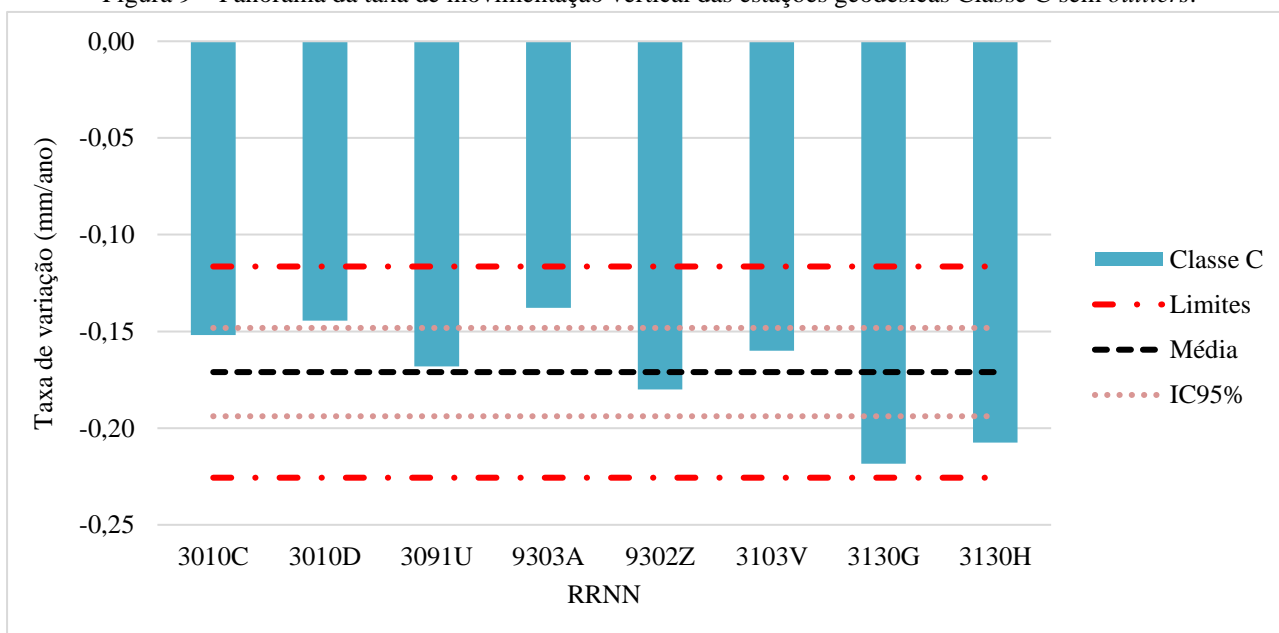
Figura 8 – Identificação de *outliers* no conjunto amostral classe C com o método Tukey.



Elaboração: Os autores (2022).

A Figura 9 apresenta o conjunto amostral classe C após a retirada dos *outliers* utilizando-se os limites do método Desvio Padrão e Intervalo de Confiança de 95%. Percebe-se que as RRNN dessa classe amostral possuem uma tendência de subsidência, já que 100% das RRNN estão nesse sentido. A taxa média de variação foi de -0,17 mm/ano. Como possíveis causas desse comportamento apontam-se fatores relacionados à acomodação do solo, rebaixamento do lençol freático e até mesmo vibrações causadas por máquinas nas proximidades das RRNN.

Figura 9 – Panorama da taxa de movimentação vertical das estações geodésicas Classe C sem *outliers*.



Elaboração: Os autores (2022).

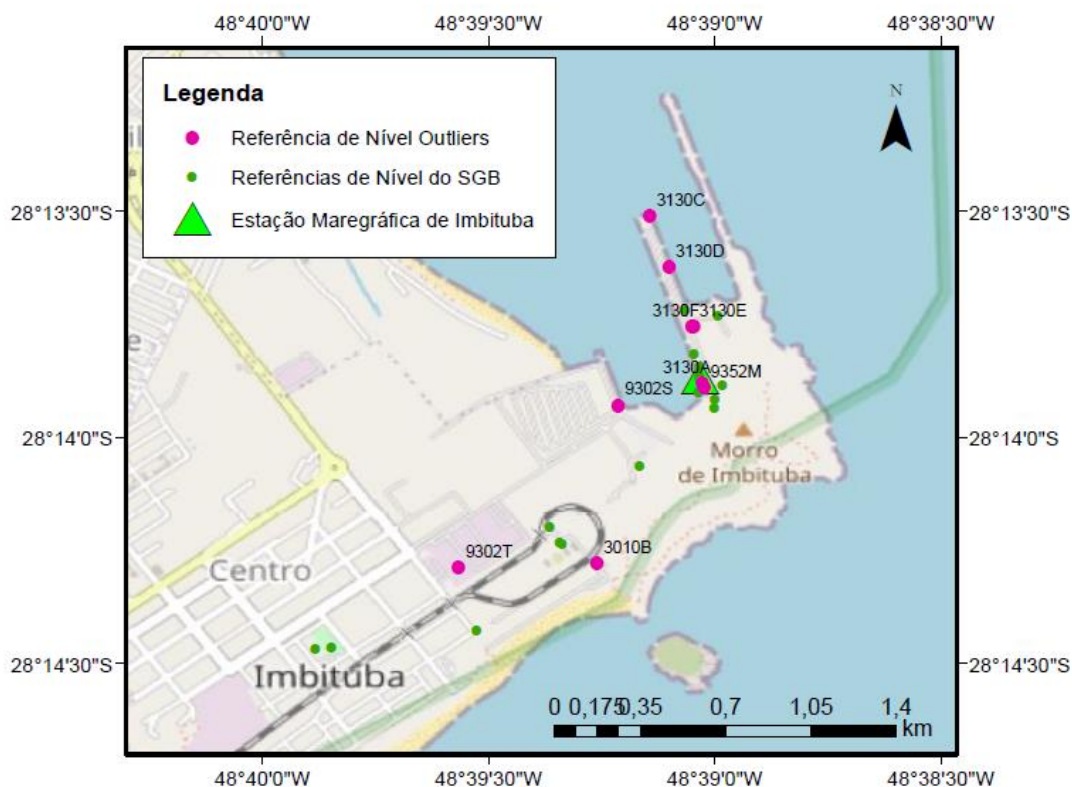
Analisando os *outliers* em separado, isto é, 53% do total das estações classificadas como classe C faz-se necessário algumas considerações acerca dos locais onde essas estações estão fixadas. Na Figura 10 é

mostrada a distribuição espacial delas.

O valor mais extremo, trata-se da RN 3130F (-4,22 mm/ano) destruída, quando o prédio onde se encontrava foi demolido. Próximo a ela, a RN 3130E provavelmente sofreu abalos importantes com o processo da demolição. As RRNN 3130C e 3130D, com taxas respectivamente de 0,18 mm/ano e -1,75 mm/ano, estão na extensão do Píer 2 recentemente construído e ainda sofrendo as devidas acomodações no solo, sendo que a 3130C está na área mais extrema do píer, o que pode justificar seu sinal invertido em relação a 3130D que está localizada no meio da estrutura. A RN 9302S (-0,55 mm/ano) é uma antiga estação padrão PORTOBRAS sobre a laje do Píer 1. Destaca-se, nesse caso, a ocorrência de movimentação constante de caminhões em suas proximidades. A RN 3130A, assim como visto com a RN 3130C, apresenta sinais de soerguimento, entretanto os motivos provavelmente são diferentes. Isolando o caso da RN 3130A: ela está em uma região que sofreu um pequeno deslizamento de terra; adicionalmente uma máquina de grande porte (*shiploader*) que estava posicionada em sua proximidade, exercendo importante peso sobre a área, foi removida para outro local, essa condição aponta a provável causa do soerguimento temporal de 0,48 mm/ano. Próximo a ela, a RN 9352M durante as últimas medições realizadas no Porto identificou-se que a estrutura em que a RN está fixada, localizada próxima a uma subestação, apresentava uma importante rachadura esse fato indica a sua elevada taxa de variação vertical de -1,22 mm/ano. Já a RN 9302T é uma antiga estação da PORTOBRAS com dimensões fora do padrão estabelecido pelo IBGE, sendo seu próprio peso um possível indicador de sua subsidência (-0,39 mm/ano).

Em contraposição as RRNN anteriormente analisadas constatou-se um interessante comportamento relacionado à RN 3010B. Trata-se de uma estação geodésica clássica situada em uma rotatória de grande movimento na entrada do Porto. A sua taxa de variação temporal, 0,06 mm/ano, está realmente discrepante do restante da sua classe (C), contudo extremamente compatível com as taxas das classes superiores.

Figura 10 – Distribuição espacial das estações geodésicas classe C com *outliers*.



Elaboração: Os autores (2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho estudou a variação da movimentação vertical de uma região que abriga a estação maregráfica necessária ao acompanhamento espacial e temporal do DVB-Imbituba. Esse estudo teve como

suporte a aplicação e análise de alguns controles de qualidade empregados a redes de nivelamento a fim de conhecer a confiabilidade dos resultados dos ajustamentos executados. Adicionalmente, métodos para determinação de taxas de variação vertical, detecção de *outliers* e aplicação de intervalos de confiança foram utilizados a fim de melhorar as análises do controle da estabilidade vertical de estações geodésicas.

No decorrer das análises ficou evidente que existe uma série de fatores que precisam ser confrontados para se ter uma ideia mais clara concernente à qualidade da rede. Isto significa que cada tipo de medida aplicada abrange um aspecto diferente da rede, assim, não é recomendável tais análises apenas por um único viés.

Em relação aos resíduos padronizados ficou constatado que a grande maioria é inferior a 0,5 mm. Logo, indicaram que as linhas analisadas não sofreram a ocorrência de inconsistências que influenciam significativamente os resultados dos ajustamentos. A confiabilidade interna mostrou um comportamento homogêneo da rede, retratando que as condições impostas para o levantamento das observações conseguiram garantir precisões melhores que as esperadas não apresentando, assim, erros significativos.

A redundância parcial mostrou que a grande maioria dos valores estão classificados como “suficiente” e “boa”, o que revela melhor capacidade na identificação de possíveis erros atrelados a rede conferindo, conseqüentemente, maior controle. Por outro lado, os números de redundância média colocam a rede em um nível abaixo do recomendado por Ghilane (2010), ou seja, os valores da redundância média resultaram menores que 0,5. Nesse sentido, a análise dos números de redundância em cada campanha permitiu verificar possíveis deficiências isoladas em termos de controle de erros, para que as próximas campanhas possam ser planejadas com maior redundância e confiabilidade neste aspecto.

Em relação a qualidade dos ajustamentos, os testes globais mostraram que a maioria dos ajustamentos não tiveram a aceitação da hipótese nula. No entanto, verificou-se que as variâncias *a posteriori* restaram inferiores em magnitude cerca de cinco vezes menor que a variância *a priori* confirmando a alta qualidade das observações.

Devido à dificuldade de identificar o tipo construtivo de algumas RRNN, preferiu-se nessa situação aplicar o pior caso, classificando-as como classe C. Uma vez resolvido a classificação das RRNN, verificou-se que as RRNN classificadas como A e B possuem uma taxa média de variação vertical estável de apenas 0,02 mm/ano, diferentemente das estações classe C, com -0,17 mm/ano.

Os três métodos de identificação de *outliers* foram unânimes na identificação de valores discrepantes, sendo o método Tukey o que necessitou de menos iterações, apresentando-se como uma alternativa robusta e que não assume a distribuição normal como premissa ao contrário dos dois outros métodos analisados.

O Intervalo de Confiança foi utilizado para avaliar a qualidade da média amostral em relação à média populacional, ou seja, para avaliar o que esperar do comportamento das classes, sendo a subsidência a condição esperada para a maior parte das RRNN classe C, conforme verificado após a exclusão dos *outliers*.

Por meio da análise dos *outliers* separadamente, ficou evidente que variados fatores influenciam na dinâmica local da variação vertical, e o acompanhamento temporal é indispensável para possibilitar as correções necessárias à determinação de uma série íntegra da variação do nível do mar livre de influências de origem não oceânica.

As RRNN situadas em locais de melhor classificação (A e B) foram as que apresentaram menores variações. No entanto, isso apenas não garante que ao longo do tempo essa estabilidade seja mantida, pois as áreas portuárias são muito dinâmicas podendo ocorrer modificações significativas na sua estrutura a ponto de afetar as RRNN ali presentes. Também devem ser considerados fatores relacionados à geologia local e regional que podem afetar a estabilidade da região.

Ao considerar os aspectos tratados e as potencialidades apontadas dessa pesquisa ficou patente que os resultados sobre a qualidade da rede podem ser melhorados por meio do aumento dos graus de liberdade dos circuitos de controle. Nesse sentido, recomenda-se aprimorar a geometria da rede e continuar a investigação ora apresentada, sobretudo, para outros sítios que abrigam as demais estações maregráficas da RMPG. Outro aspecto relevante a ser acrescentado a análise são as taxas de variação vertical oriundas das séries GNSS. Essas necessitam ser confrontadas com os resultados dos levantamentos altimétricos provenientes do Nivelamento Geométrico Científico. Outros testes poderão ser aplicados futuramente, como por exemplo, a análise da variância *a posteriori* para cada ajustamento (ANOVA) e a análise de correlação entre as estatísticas de teste conforme Rofatto et al. (2020) e Bonimani et al. (2021). Por fim, as análises realizadas ainda carecem de uma



série temporal mais longa que possa indicar resultados mais consistentes de modo que seja possível classificar as RRNN não apenas pelo seu método construtivo, mas também por meio da sua variação temporal.

## Contribuição dos Autores

Os autores E. G. S. e S. S. contribuíram com a Conceptualização, Curadoria dos dados, Análise formal, Investigação, Metodologia, Validação, Visualização, Redação – minuta inicial e na Redação – revisão e edição do trabalho. O autor I. K. contribuiu com a Conceptualização, Análise formal, Validação e Redação – revisão e edição.

## Conflitos de Interesse

Os autores declaram que há nenhum conflito de interesse.

## Referências

- BAARDA, W. **A Testing procedure for use in geodetic networks**. Delft: Citeseer, 1968. v. 2. 97p
- BAARDA, W. **S-transformations and criterion matrices**. Delft: Netherlands Geodetic Commission, 1973. v. 4.
- BEZERRA, E. **Intervalos de confiança - amostras pequenas**. CEFET/RJ. 2018. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://eic.cefet-rj.br/~ebezerra/wp-content/uploads/2017/07/IE05c-Intervalos-de-Confian%C3%A7a-Amostras-Pequenas.pdf>. / . Acesso em: 27 abr. 2022
- BONIMANI, M. L. S.; ROFATTO, V. F.; MATSUOKA, M. T.; KLEIN, I.; VERONEZ, M. R.; DA SILVEIRA JR, L. G. O Efeito das Covariâncias entre os Componentes de Linha Base sobre a Confiabilidade de Redes GNSS: Resultados para uma Rede com Alta Redundância. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 666–684, 2021. DOI. 10.14393/rbcv73n2-58105
- CRAYMER, M. **Geodetic adjustment using Helmert blocking Of Space and Terrestrial data**. 2017. Disponível em: <http://www.naref.org/ghost/>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- COLLISCHONN, C., KLEIN, I., MATSUOKA, M. T. Estudos de confiabilidade em uma rede geodésica In: III Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente - SP **Anais...**, 25-27 de julho de 2012. v.2. p. 374-375 ISSN 1981-6251. Disponível em: [http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012\\_III\\_SBG/\\_resumos/R106.pdf](http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2012_III_SBG/_resumos/R106.pdf). Acesso em: 27 abr. 2022.
- COLLISCHONN, C.; MATSUOKA, M. T.; GUZATTO, M. P.; KLEIN, I.; LIMA, E. M.; SOUZA, S. F. Análise de confiabilidade de rede GNSS e repetição de linhas-base. **Revista Brasileira de Cartografia, EDUFU - Editora da Universidade Federal de Uberlândia**, v. 67, n. EE, p. 41683–1703, 2015. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/49229>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- DALAZOANA, R. **Estudos dirigidos à análise temporal do datum vertical brasileiro**. 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3922>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- DE FREITAS, S. R. C.; BLITZKOW, D. Altitudes e geopotencial. **IGeS Bulletin**, Special Issue for South America, n. 9, p. 47–62, 1999.
- FERREIRA, D, F. **Estatística Básica**. Lavras. Editora UFLA. 2005
- FONSECA, V. M. **Detecção de outliers em dados amostrais de uma pesquisa econômica**. 153 f. Dissertação (Curso de Mestrado em Estudos Populacionais e Pesquisas Sociais) – Escola Nacional de Ciências Estatísticas, Rio de Janeiro, RJ, 2011. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81211.pdf> .Acesso em: 27 abr. 2022.

- FRENCH NATIONAL COMMITTEE OF GEODESY AND GEOPHYSICS (FNCGG). **Quadrennial Report Of CNFGG To IUGG**. 2011. Disponível em: <https://office.iag-aig.org/doc/5d8dd34b877b7.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- GEMAEL, C.; MACHADO, A. M. L.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. 2. Ed. Curitiba: UFPR, 2015. 428 p.
- GHILANI, D. C. **Adjustment computations: Spatial data analysis**. 5th. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2010. 720 p.
- HAILEGEBEREL, M.; GLASSMIRE, K.; JOHNSON, A.; SAMANT, M.; DUSEK, G. **User's Guide to Vertical Control and Geodetic Leveling for COOPS Observing Systems**. 1. ed. Silver Spring, 2018. 69 p. Disponível em: [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Users\\_Guide\\_to\\_Vertical\\_Control\\_and\\_Geodetic\\_Leveling\\_for\\_CO-OPS\\_Observing\\_Systems-May\\_2018.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Users_Guide_to_Vertical_Control_and_Geodetic_Leveling_for_CO-OPS_Observing_Systems-May_2018.pdf). Acesso em: 27 abr. 2022
- INSTITUT NATIONAL DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE ET FORESTIÈRE (IGN). **L'entretien actuel du réseau métropolitain**. 2017. Disponível em: <https://geodesie.ign.fr/index.php?page=ernit>. Acesso em: 27 abr. 2022
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e normas gerais para levantamentos geodésicos**. Resolução PR 22/83. Rio de Janeiro: Boletim de Serviço – Suplemento, 1983. 12 p. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos\\_e\\_outros\\_documentos\\_de\\_referencia/normas/bservico1602.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/bservico1602.pdf). Acesso em: 27 abr. 2022
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Padronização de marcos geodésicos**. Rio de Janeiro, ago. 2008. 27 p. Norma de serviço n. 1/2008, da Diretoria de Geociências. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/normas/16466-padronizacao-de-marcos-geodesicos.html?edicao=16471&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- 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: Manuais Técnicos em Geociências, 2010. 38 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Relatório de Monitoramento da Variação do Nível Médio do Mar nas estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia 2001-2012**. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Relatório Técnico, 2013. 47 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Análise do Nível Médio do Mar nas Estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG - 2001 a 2015**. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Relatório Técnico, 2016. 61 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Especificações e Normas para Levantamentos Geodésicos associados ao Sistema Geodésico Brasileiro**. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, Manual Técnico, 2017. 56 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais**. Rio de Janeiro: Diretoria de Geociências, 2. ed. 2019. 56 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Monitoramento da variação do nível médio do mar nas estações da Rede Maregráfica Permanente para Geodésia: 2001-2020** / IBGE, Coordenação de Geodésia. - Rio de Janeiro: IBGE, 2021. 121p
- INTERGOVERNMENTAL OCEANOGRAPHIC COMMISSION (IOC). **Manual on Sea Level Measurement and Interpretation - An update to 2006**. Paris: UNESCO-IOC, Manuals and Guides N 14, 2006. v. 4. 87 p. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000147773>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- KLEIN, I. **Controle de Qualidade no Ajustamento de Observações Geodésicas**. 322 f. Dissertação (mes trado em Sensoriamento Remoto). Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2012.

- KUANG, S. **Geodetic Network Analysis and Optimal Design: Concepts and Applications**. Chelsea: Ann Arbor Press, Inc, 1996. 368 p.
- LUZ, R. T. **Estratégias para Modernização da Componente Vertical do Sistema Geodésico Brasileiro e sua Integração ao SIRGAS**. 207 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/17075>. Acesso em: 10 jun. 2020.
- LUZ, R. T.; GUIMARÃES, V. M. Dez anos de monitoramento do Nível do Mar no IBGE. In: Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CBCG). Curitiba: [s.n.], **Anais...** 2003. v. 3. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/metodos-e-outros-documentos-de-referencia/outros-documentos-tecnicos-geo/16390-dez-anos-de-monitoramento-do-nivel-do-mar-no-ibge.html?=&t=sobre>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- MCCORMAC, J. **Topografia**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 408 p.
- MORAES, C. V. de. **Aprimoramento da concepção do modelo geodésico para a caracterização de extremas no espaço geométrico**. 277 f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/32982>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- MÜRLE, M.; BILL, R. Zuverlässigkeits – genauigkeits- untersuchungebener geodätischernetze. **Allgemeine Vermessungs- Nachrichten**, Karlsruhe, v. 91, n. 2, p. 45–62, 1984.
- NOWAK, E.; ODZIEMCZYK, W. Impact analysis of observation coupling on reliability indices in a geodetic network. **Reports on Geodesy and Geoinformatics**, Walter de Gruyter GmbH, v. 106, n. 1, p. 1–7, Dec. 2018. DOI. 10.2478/rgg-2018-0008.
- ROFATTO, V. F.; MATSUOKA, M. T.; KLEIN, I. Design of geodetic networks based on outlier identification criteria: an example applied to the leveling network. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, n. 2, p. 152–170, 2018. DOI. 10.1590/S1982-21702018000200011
- ROFATTO, V. F. **Uma Extensão à Teoria da Confiabilidade em Geodésia**. 234 f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2020.
- ROFATTO, V. F.; MATSUOKA, M. T.; KLEIN, I.; VERONEZ, M. R., DA SILVEIRA JR., L. G. A Monte Carlo Based outlier diagnosis method for sensitivity analysis. **Remote Sensing**, v. 12, n. 5, p. 1–41, 2020. DOI. 10.3390/rs12050860
- SANTOS, E. G. **Integração entre a Rede Altimétrica de Alta Precisão, a Rede Geodésica de Referência Costeira e os Níveis de Referência Maregráficos**. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica). Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro. 2021.
- SEO, S. **A Review and Comparison of Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets**. 56 f. Dissertation (Master of Science) - Graduate School of Public Health in partial fulfillment, University of Pittsburgh, Pittsburgh, Pennsylvania, 2006. Disponível em: <http://d-scholarship.pitt.edu/7948/1/Seo.pdf> . Acesso em: 27 abr. 2022.
- SOARES, S.; SANTOS, E. G.; LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira (RGRC) como insumo para integração de altitudes e profundidades: resultados preliminares. In: VII Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife: **Anais...Recife**.UFPE, 2018. p. 742–751. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/39451/1384233/Anais+do+VII+SIMGEO/2ff23c73-935d-4418-8728-fefb24630f34>. Acesso em: 27 abr. 2022.
- SOARES, S.; SANTOS, E. G.; LUZ, R. T. Avaliação metodológica para conexão da estação GNSS (Global Navigation Satellite System) permanente de Imbituba a Rede Altimétrica Brasileira. In: Simpósio SIRGAS. Rio de Janeiro 2019 **Anais...** Boletim: No. 24. Disponível em:[http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71\\_Soares\\_et\\_al\\_2019\\_Conexion\\_Imbituba\\_GNSS.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol24/71_Soares_et_al_2019_Conexion_Imbituba_GNSS.pdf). Acesso em: 27 abr. 2022.
- SOARES, S.; SANTOS, E. G.; SIQUEIRA, J. C. S.; LIMA, M. K.; LUZ, R. T. Rede Geodésica de Referência Costeira: ações preliminares para integração de altitudes e profundidades In. XIII Simpósio sobre Ondas,

Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite **Anais...** Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira. Arraial do Cabo-RJ. 2019. Disponível em [https://www.omarsat.com.br/\\_files/ugd/f9878c\\_679a7728c2c64f87b1a53338f046ce7d.pdf](https://www.omarsat.com.br/_files/ugd/f9878c_679a7728c2c64f87b1a53338f046ce7d.pdf). Acesso em: 24 mai. 2022.

SURACI, S. S.; OLIVEIRA, L. C.; KLEIN, I. Two aspects on L1-norm adjustment of leveling networks. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 486-500, 2019. DOI. 10.14393/rbcv71n2-47697.

SURACI, S. S.; OLIVEIRA, L. C. Aplicação das normas L1 e  $L_{\infty}$  em redes altimétricas: identificação de outliers e construção do modelo estocástico. **Revista cartográfica**, n. 101, p. 135-153, 2020. DOI. 10.35424/rcarto.i101.669.

TEUNISSEN, P. J. G. **Testing theory**: an introduction. 2nd. ed. Delft: VSSD Delft, 2006.147 p.

TORGE, W.; MÜLLER, J. **Geodesy**. 4th. ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2012. 433 p.

TRIPATHY S. S., SAXENA R. K., GUPTA P. K. Comparison of Statistical Methods for Outlie Detection in Proficiency Testing Data on Analysis of Lead in Aqueous Solution, American **Journal of Theoretical and Applied Statistics**. Vol. 2, No. 6, pp. 233-242, 2013.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis**. Addison-Wesley.1977. DOI. 10.11648/j.ajtas.20130206.21

ZERVAS, C. **Sea level variations of the United States 1854-2006**. Silver Spring: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA, Dec. 2009. 194 p. (NOAA technical report NOS CO-OPS, 53). Disponível em: [https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech\\_rpt\\_53.pdf](https://tidesandcurrents.noaa.gov/publications/Tech_rpt_53.pdf). Acesso em: 24 mai. 2022

## Biografia do autor principal



Everton Gomes dos Santos nasceu em Pojuca-BA, em 1983. É Engenheiro Agrimensor formado pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (2007). Mestre em Engenharia Cartográfica pelo Instituto Militar de Engenharia (2021). Atualmente ocupa o cargo de Tecnologista em Informações Geográficas e Estatísticas no IBGE, onde atua na Coordenação de Geodésia com ênfase em Redes de Referência Vertical e monitoramento do Nível Médio do Mar para fins geodésicos na Rede Maregráfica Permanente para Geodésia – RMPG. Interesse nas áreas de geodésia física, oceanografia física e meio ambiente.



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