



## Dinâmica do Nível da Água na Cidade de Rio Grande (RS) Durante a Grande Cheia de Maio de 2024: Comparação entre Sensor GNSS-R e Marégrafos Convencionais

*Water Level Dynamics in Rio Grande City (RS) During the Major Flood of May 2024 Assessed Using a GNSS-R Sensor and Conventional Tide Gauges*

Manuella Anaís Rodrigues Fagundes<sup>1</sup> e Felipe Geremia Nievinski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. [manuella.fagundes@ufpe.br](mailto:manuella.fagundes@ufpe.br)

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3447-8582>

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. [felipe.nievinski@ufrgs.br](mailto:felipe.nievinski@ufrgs.br)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3325-1987>

Recebido: 03.2025 | Aceito: 04.2025

**Resumo:** A cidade de Rio Grande (RS) foi parcialmente inundada em maio de 2024, quando um extremo climático elevou significativamente o nível da Lagoa dos Patos. Diante deste cenário, analisamos a dinâmica do nível da água no estuário de Rio Grande durante o evento, comparando dados obtidos por um marégrafo refletométrico baseado em satélites de navegação (GNSS-R) e por cinco marégrafos convencionais: uma régua, três sensores radar e um sensor de pressão. A comparação entre o GNSS-R e a régua, coincidentes espacialmente, demonstrou forte coeficiente de determinação (0,99) e desvio padrão centimétrico (3,8 cm). Já a comparação entre GNSS-R e o sensor mais distante (20 km) resultou em um coeficiente de determinação menor (0,6) e desvio padrão decimétrico, como consequência da variabilidade espacial no nível da água entre o estuário e a região dos molhes. Para melhor compreender a dinâmica do nível da água, foi realizada uma análise harmônica, considerando as principais constituintes diurnas de maré, K1 e O1. As análises harmônicas apontaram a complexidade da dinâmica da água na região em termos de amplitude e fase. Por fim, os resultados indicaram um forte coeficiente de determinação entre as medições do sensor GNSS-R e dos sensores convencionais, apontando que a concordância é inversamente proporcional à distância entre os sensores.

**Palavras-chave:** Altimetria GNSS-R. Dinâmica do nível da água. Marégrafos.

**Abstract:** The city of Rio Grande (RS) was partially flooded in May 2024, when an extreme weather event significantly increased the water level of the Patos Lagoon. In this context, we analyzed the water-level dynamics in the Rio Grande estuary during the event by comparing data obtained from a reflectometric tide gauge based on navigation satellites (GNSS-R) with measurements from five conventional tide gauges: a staff gauge, three radar sensors, and a pressure sensor. The comparison between the GNSS-R sensor and the co-located staff gauge showed a strong coefficient of determination (0.99) and a centimeter-level standard deviation (3.8 cm). In contrast, the comparison between the GNSS-R sensor and the most distant gauge (20 km) resulted in a lower coefficient of determination (0.6) and a decimeter-level standard deviation, because of the spatial variability in water level between the estuary and the breakwater region. To better understand the water-level dynamics, a harmonic analysis was conducted considering the main diurnal tidal constituents, K1 and O1. The harmonic analyses highlighted the complexity of the water-level dynamics in terms of amplitude and phase. Finally, the results indicated a strong coefficient of determination between the GNSS-R measurements and those of the conventional sensors, demonstrating that agreement is inversely proportional to the distance between sensors.

**Keywords:** GNSS-R altimetry. Water level dynamics. Tide Gauges.

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o século XVIII, Rio Grande (RS) tem se desenvolvido em estreita relação com a Lagoa dos Patos e o Oceano Atlântico (Torres, 2012). A cidade possui registros históricos do aumento do nível das águas e de eventos climáticos extremos, como a Grande Enchente de 1941. Com o agravamento das mudanças climáticas, a necessidade de mitigar danos e garantir a segurança da população se torna cada vez mais emergente. Nesse contexto, a medição do nível hídrico é essencial para prever fluxos, delinear áreas de risco

e projetar estruturas adequadas (Marques & Möller, 2008; Nogueira, 2006; Oliveira, 2008).

Régulas linigráficas ou maregráficas para leitura visual/manual e sensores limimétricos automáticos são largamente utilizados para monitorar as variações da altura da lâmina d'água. Dentre os instrumentos maregráficos convencionais, destacam-se as sondas de pressão hidrostática e o sensor radar altímetro. Estes equipamentos operam sob ou sobre a superfície da água, respectivamente, o que os deixa suscetíveis a danos durante variações atípicas do nível. A instalação envolve uma combinação de operações logísticas e tecnológicas, e a precisão depende da escolha do local e da manutenção regular. Ademais, os medidores convencionais estão sujeitos à destruição, permanecendo inoperantes durante condições extremas (Carrillo, 2024; Geremia-Nievinski et al., 2024; Marcuzzo et al., 2024).

Diante deste cenário, a Refletometria via Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS-R) emergiu como uma alternativa inovadora e promissora para a maregrafia. A técnica se baseia no princípio do radar bistático, em que receptor e transmissor estão distantes um do outro, e utiliza ondas de rádio produzidas por satélites de posicionamento/navegação para realizar o sensoriamento remoto da Terra (Larson, 2016). Dentre as aplicações em diferentes condições ambientais, é possível destacar o monitoramento de nível da água em estações costeiras e ribeirinhas (Holden & Larson, 2021; Larson et al., 2017; Purnell, Gomez, Minarik, & Langston, 2024). A operação da GNSS-R a partir das margens, a uma distância segura do mar, rio ou lagoa, confere maior robustez e integridade contra ressacas e enxurradas que frequentemente danificam os equipamentos de medição convencionais.

Em maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul sofreu com enchentes severas generalizadas que foram responsáveis pela perda de estações fluviométricas. Neste trabalho, analisou-se a dinâmica do nível da água na Lagoa dos Patos, mais precisamente na região estuarina de Rio Grande, durante o período da cheia. Para isso, foram utilizados todos os marégrafos com dados acessíveis no município, sendo um GNSS-R e cinco convencionais. Dentre os convencionais há uma régua, três sensores radar e um sensor de pressão. O estudo buscou avaliar a aplicação da técnica GNSS-R, através do uso de um sensor de código aberto desenvolvido por Fagundes, Tinti, Iescheck, Akos e Nievinski (2021), posteriormente aprimorado pela startup TideSat (Fagundes et al., 2021), em um cenário de evento climático crítico. Ademais, explorou-se a dinâmica da água a partir da análise do comportamento da maré nas duas componentes, astronômica e meteorológica, em diferentes pontos da cidade. Esperamos com essa investigação contribuir para o planejamento de ações visando aumentar a resiliência municipal.

A seguir, revisaremos brevemente a fundamentação teórica das técnicas empregadas. Na sequência, detalharemos a metodologia utilizada neste experimento. Posteriormente, os resultados numéricos e gráficos serão apresentados e discutidos. Por fim, o trabalho encerrará com conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO

### 2.1 Maregrafia convencional

A Comissão Oceanográfica Intergovernamental (IOC) estabelece orientações detalhadas para o monitoramento do nível do mar, desde o planejamento até a instalação e manutenção de marégrafos. O *Manual sobre Nível do Mar* (2006), publicado pela entidade, enfatiza a necessidade de redundância e estabelece que pelo menos dois sensores são necessários para garantir a continuidade dos dados. Da mesma forma, reforça a necessidade de um receptor GNSS instalado o mais próximo possível do marégrafo, visando o monitoramento da sua posição altimétrica (IOC, 2006).

Em muitas aplicações, como estudos climáticos, são essenciais séries temporais de longo prazo. Contudo, no Brasil, apenas duas estações maregráficas possuem registros com duração acima de cinquenta anos (PSMSL, 2019). Por outro lado, o enfrentamento à vulnerabilidade exige a redundância de dados em cada local de instalação, para que seja garantido o monitoramento contínuo por longos períodos.

O cenário fluvial enfrenta as mesmas dificuldades comuns a todo sistema de monitoramento, dentre eles o roubo e o vandalismo. Outrossim, as tecnologias convencionais de medição automática, como sensores de pressão e radar, apresentam desafios relacionados a altos custos de instalação e manutenção, além de estarem sujeitas a falhas durante a ocorrência de eventos extremos. Os marégrafos de pressão, por exemplo, podem exigir mergulhadores para instalação, enquanto o radar necessita de uma estrutura de suporte muitas

vezes robusta. A régua, opção mais comum, embora de baixo custo, pode ser ineficiente em condições extremas, como secas e cheias, além de necessitar de um leitorista in loco. Além disso, a diversidade de equipamentos dificulta a manutenção, demandando profissionais capacitados para calibração e ajustes. Embora os equipamentos convencionais sejam altamente precisos, todos os métodos estão sujeitos a erros sistemáticos e aleatórios. Fatores como vibração do suporte e condições climáticas adversas podem afetar as medições do radar, enquanto marégrafos de pressão são sensíveis à densidade da água e a sedimentação (IOC, 2006; Míguez et al., 2012).

## 2.2 REFLETOMETRIA GNSS

A refletometria GNSS (GNSS-R) consiste em um método que permite estimar parâmetros ambientais no entorno de uma antena GNSS (Larson, 2016). Faz uso de uma antena e de um receptor capazes de captar ondas de rádio advindas de satélites de navegação global. Quando empregada a partir de plataformas terrestres (ao invés de aéreas ou orbitais), a modalidade mais comum de GNSS-R é chamada de Refletometria Interferométrica GNSS (GNSS-IR). Baseia-se em análises dos padrões de interferência, construtiva ou destrutiva, da observável razão sinal/ruído (em inglês, *signal-to-noise ratio*, SNR). São resultados da sobreposição de ondas de rádio propagadas por múltiplos caminhos, diretamente e indiretamente ou refletidos (Roesler & Larson, 2018).

A tendência presente nas observações SNR é imposta pela contribuição do padrão de ganho da antena. Os dados SNR para cada satélite podem ser modelados conforme a Eq. (1), definida por Geremia-Nievinski (2023):

$$s(e) = A(e) \cdot \cos(4\pi\lambda^{-1}H \sin(e) + \phi(e)) \quad (1)$$

onde, o parâmetro  $A$  representa a amplitude do SNR,  $e$  representa o ângulo de elevação do satélite,  $H$  a altura do refletor,  $\lambda$  o comprimento de onda da onda portadora, e  $\phi$  a fase interferométrica não geométrica (Nievinski & Larson, 2014). Para as aplicações altimétricas, como no contexto de monitoramento de nível da água, considera-se o primeiro e o último parâmetros ( $A$  e  $\phi$ ) praticamente constantes para arcos de rastreio curtos. A elevação do satélite advém das efemérides orbitais. O parâmetro incógnito de interesse em altimetria é apenas a altura do refletor (mar ou rio),  $H$ . Assim, a Eq. (1) pode ser aproximada como uma senoide,  $s \approx A \cos(H k_z + \phi)$ , usando  $k_z = 4\pi\lambda^{-1} \sin(e)$  como variável independente ao invés do tempo e com a incógnita  $H$  tomando o papel normalmente reservado para frequência.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Área de estudo

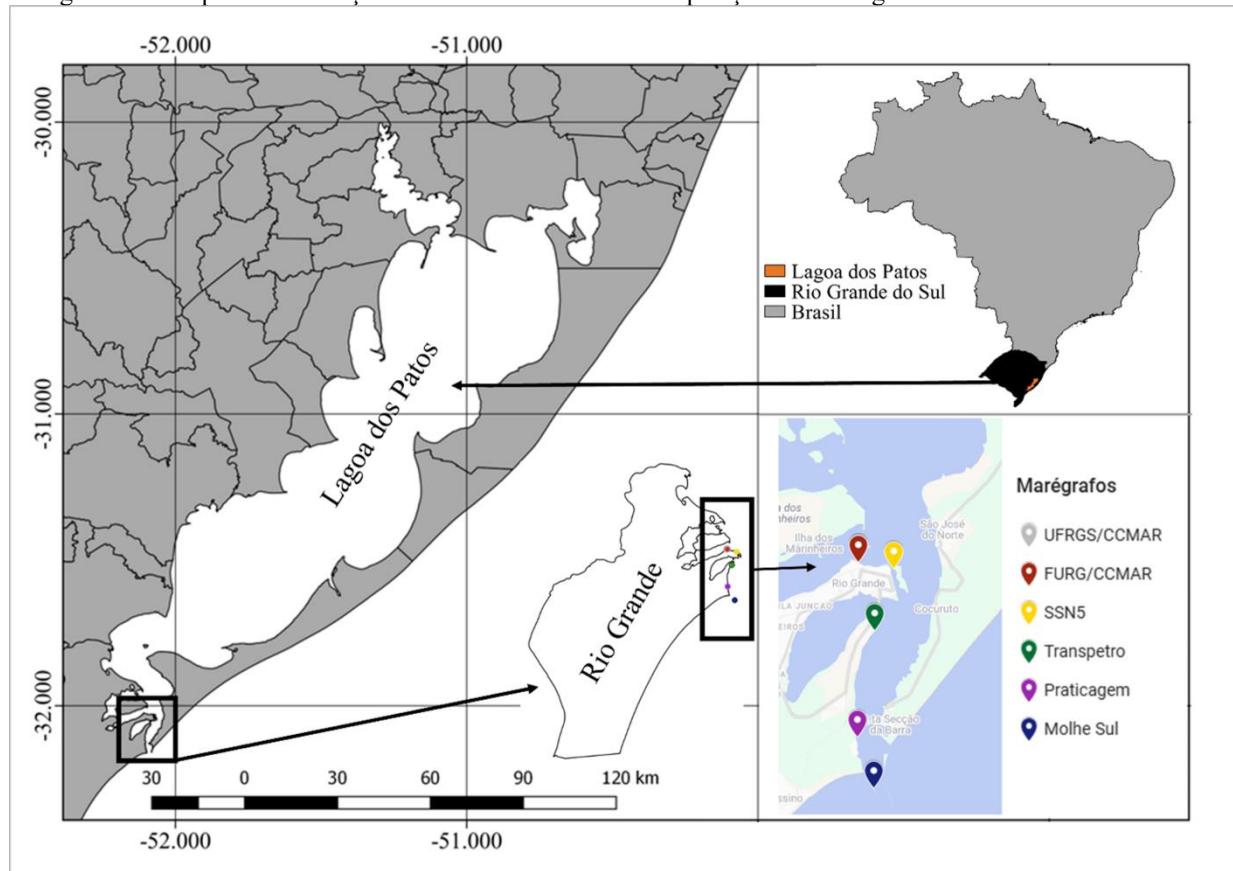
Rio Grande é um município gaúcho integrante da chamada Costa Doce, um dos maiores complexos lacustres do mundo. Situado na margem sul do estuário que conecta a Lagoa dos Patos ao Oceano Atlântico, a Capital Nacional das Águas (Lei nº 14.746, 2023) é limitada ao norte pela Laguna dos Patos e pelo município de Pelotas, ao sul pelo município de Santa Vitória do Palmar, ao leste pelo Oceano Atlântico e Canal do Rio Grande, e a oeste pelos municípios de Pelotas e Arroio Grande e pela Lagoa Mirim (Valente, Silva, Straube, & Nascimento, 2011). Esta região estuarina da Lagoa dos Patos é peculiar devido à sua hidrodinâmica e aos riscos associados ao aumento do nível da lagoa, fato que pode gerar alagamentos e exigir a evacuação da população que vive em áreas de risco.

A maré neste ambiente é um fator importante na dinâmica do nível, no transporte de sedimentos e na salinidade do ambiente estuarino. Embora a maré astronômica seja um dos fatores responsáveis pela variação do nível da água, a interação com os ventos, a forma da lagoa e a resistência da barra de entrada podem modificar a amplitude e a frequência dos efeitos da maré. Esse fenômeno tem um impacto direto na ecologia local, influenciando a biodiversidade e os habitats da região (Marques & Möller, 2008).

O monitoramento do nível das águas ao redor da cidade é realizado por diferentes instituições, através do uso de marégrafos, incluindo cinco convencionais: Universidade Federal do Rio Grande - Centro de

Convívio dos Jovens do Mar (FURG/CCMAR), Portos RS e Spectrah (SSN5, Transpetro e Praticagem) e Portos RS e SiMCosta (Molhe Sul). Além dos marégrafos convencionais, há um sensor GNSS-R da Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS), que fica abrigado no CCMAR (UFRGS/CCMAR). Todos esses sensores operam com telemetria e estão distribuídos ao longo da costa leste da cidade, desde o centro até os Molhes da Barra (Figura 1).

Figura 1 – Croqui de localização da área de estudo com a disposição dos marégrafos na cidade de Rio Grande.



Elaboração: Os autores (2025).

### 3.2 Obtenção dos dados convencionais

Inicialmente, os sensores a serem utilizados foram definidos considerando a disponibilidade dos dados e a dispersão geográfica. O período definido para comparação entre as séries compreendeu o intervalo entre 1º de abril e 31 de julho de 2024, com duração de quatro meses, incluindo o evento climático extremo de maio de 2024 e as condições imediatamente prévias e posteriores. Salienta-se a exceção, referente à comparação entre UFRGS/CCMAR e FURG/CCMAR, que compreendeu um período menor. Isso ocorreu devido a série temporal disponível de FURG/CCMAR possuir apenas 73 dias.

Os dados foram obtidos a partir de quatro fontes (Mario, 2023), vide Tabela 1. Quanto à coleta, observa-se que para registrar as leituras de nível, a régua possui uma câmera acoplada, cujas imagens são lidas por fotogrametria (FURG, 2024). Para os demais marégrafos, considerou-se os registros em sua forma primária, com exceção do Molhe Sul, para o qual optou-se pelo uso dos dados filtrados por média móvel pelo produtor dos dados (SiMCosta). Observa-se que os dados filtrados possuíam uma redução significativa de anomalias (*outliers*). A Tabela 1 resume ainda as principais características dos sensores utilizados na comparação entre as séries temporais. Essas informações foram cruciais na investigação do comportamento da água durante o evento. Convém destacar que na Praticagem há um segundo sensor, do tipo pressão hidrostático, que não foi usado devido elevada presença de dados anômalos.

Tabela 1 - Marégrafos utilizados em Rio Grande (RS), incluindo a distância com relação ao sensor GNSS-R.

|             | <b>Tipo</b> | <b>Espaçamento temporal (minutos)</b> | <b>Distância (km)</b> | <b>Acesso aos dados</b>   | <b>Duração (dias)</b> |
|-------------|-------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| UFRGS/CCMAR | GNSS-R      | 10                                    | 0                     | TideSat (Portos RS)       | 318                   |
| FURG/CCMAR  | Régua       | 60                                    | 0,01                  | Agência Nacional de Águas | 73                    |
| SSN5        | Pressão     | 5                                     | 2,9                   | Spectrah (Portos RS)      | 113                   |
| Transpetro  | Radar       | 1                                     | 8,0                   | Spectrah (Portos RS)      | 122                   |
| Praticagem  | Radar       | 1                                     | 15,9                  | Spectrah (Portos RS)      | 183                   |
| Molhe Sul   | Radar       | 1                                     | 19,7                  | SiMCosta                  | 123                   |

Elaboração: Os autores (2025).

### 3.2.1 COLETA E PROCESSAMENTO DOS DADOS GNSS-R

O sensor de Rio Grande foi instalado em 30 de setembro de 2023 pela UFRGS em parceria com a autoridade portuária gaúcha, Portos RS, através do Programa de Gestão Ambiental do Porto de Porto Alegre (Prestes et al., 2021). Os dados de nível da água coletados, com capacidade de transmissão dos dados em tempo real via rede celular, são processados e disponibilizados pela TideSat (*spin-off* da UFRGS). O uso da GNSS-R tem o objetivo de representar uma garantia de redundância visando a continuidade da série temporal do nível da Lagoa dos Patos. É oportuno observar que tais dados foram utilizados pela Prefeitura de Rio Grande para emitir boletins à população durante as enchentes que assolaram o Rio Grande do Sul em maio de 2024. A Figura 2 mostra o local de instalação do sensor GNSS-R, com destaque para a antena GNSS (enquadrada em cor vermelha), posicionada de forma a garantir cobertura azimutal para as reflexões advindas da água.

Figura 2 - Instalação da estação GNSS-R em Rio Grande, com destaque para a antena (vermelho).



Elaboração: Os autores (2025).

Para o processamento de dados SNR em tempo real, foi usado o software gnssrefl, implementado em linguagem Python (Larson, 2024) e de código aberto. Este pacote assessorou no cálculo e avaliação dos parâmetros de refletometria baseados em GNSS, permitindo a recuperação da altura da água em relação a um referencial local. A Tabela 2 resume alguns dos parâmetros que auxiliaram no refinamento do processamento dos dados.

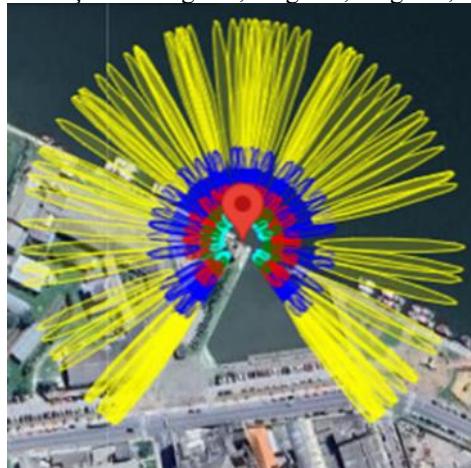
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no processamento da estação GNSS-R de Rio Grande; a altura é um valor nominal médio; o intervalo azimutal tem sentido horário.

| <b>Parâmetros</b>           | <b>Valores adotados</b> |
|-----------------------------|-------------------------|
| Altitude elipsoidal         | 10,575 m                |
| Altura da antena até a água | 12 m                    |
| Constelações                | GPS                     |
| Frequência da portadora     | L1                      |
| Intervalo azimutal          | 330 a 90 graus          |
| Intervalo de elevação       | 5 a 30 graus            |

Elaboração: Os autores (2025).

O processamento com o gnssrefl tem início com o cálculo das elevações e azimutes dos satélites em relação ao horizonte local, a partir das efemérides (transmitidas ou precisas). Em seguida, visualiza-se o alcance das zonas de reflexão de Fresnel, que indicam a região no entorno do ponto de reflexão espelhada sobre o plano horizontal ao redor da antena; esta etapa é fundamental para descartar refletores ou obstruções indesejadas (Larson, Nievinski, & Freymueller, 2013). As zonas de Fresnel são elipses cuja dimensão é determinada pela altura da antena sobre a superfície refletora, o ângulo de elevação entre o satélite e o horizonte local e o comprimento de onda da portadora (Larson & Nievinski, 2013). A Figura 3 ilustra as zonas de Fresnel na estação UFRGS/CCMAR, que auxiliaram na delimitação do azimute necessário para recuperar a altura da água nas proximidades da estação, destacando a importância de descartar azimutes fora das zonas de reflexão de interesse. O intervalo de elevação foi escolhido considerando a distância entre a antena e a água. Quanto menores as elevações consideradas, mais distante se encontrará as reflexões. Da mesma forma, quanto maior a elevação, mais perto estará o ponto de reflexão. Nesse contexto, para que a antena não capte reflexões fora da água, determinou-se o intervalo de elevação entre 5 e 30 graus, preservando recuperações de altura da água a uma distância horizontal entre 15 e 102 metros da antena. Assim, obstruções muito próximas da antena (como o cais e embarcações ancoradas nele) terão as reflexões descartadas.

Figura 3 - Zonas de reflexão no entorno da estação GNSS-R de Rio Grande; as elipses em cores ciano, verde, vermelha, azul e amarelo são referentes a uma elevação de 25 graus, 20 graus, 15 graus, 10 graus, e 5 graus, respectivamente.



Elaboração: Os autores (2025).

O software gnssrefl emprega uma análise espectral, por meio do Periodograma de Lomb-Scargle (LSP), para extrair a frequência dominante dos dados SNR. Ainda que os dados SNR sejam amostrados com espaçamento regular no tempo, ele é irregular em termos de ângulo de elevação, que é uma variável independente na equação (1). Após determinar a altura do refletor para cada arco de satélite nascente ou poente, é obtida uma série de nível da água irregular no tempo. Para regularizar a amostragem altimétrica no tempo, é aplicado um ajuste de curva *spline*, composta por segmentos polinomiais cúbicos conectados de forma contínua em pontos específicos (4 nós por dia). Esse ajuste suaviza o ruído aleatório e mantém a curva próxima aos dados reais, levando em conta as variações que ocorrem devido às condições do refletor, como marés (Purnell et al., 2020; Strandberg, Hobiger, & Haas, 2016). Após o ajustamento da curva *spline*, ela é avaliada a cada 10 minutos, para gerar uma série de nível da água regularmente espaçada no tempo. Porém, é importante notar que esse espaçamento temporal não representa a resolução temporal propriamente, que não é constante na altimetria por GNSS-R, variando conforme os satélites se deslocam no céu. Em resumo, as etapas de processamento incluem: separar os arcos dos satélites GNSS, calcular periodogramas para determinar as frequências dominantes (relacionadas às alturas do refletor) e, finalmente, filtrar a série temporal da altura da água.

### 3.3 Compatibilização entre sensores

Para garantir a compatibilidade entre as séries, realizou-se a plotagem dos dados, identificando

possíveis deslocamentos temporais ou verticais. Foi ajustado o fuso horário, pois as séries FURG/CCMAR e Praticagem estavam no fuso de Brasília (UTC-3), enquanto as demais séries estavam em GMT/UTC. Em seguida, foi realizada a compatibilização entre séries em referenciais altimétricos distintos, alinhando-as verticalmente. A série da UFRGS/CCMAR foi interpolada linearmente em relação ao tempo de amostragem de cada uma das séries convencionais, garantindo a correspondência temporal entre os conjuntos de dados. Para manter a integridade da interpolação, nesta etapa determinou-se uma tolerância de 10 minutos, para descartar períodos de falha dos sensores. A partir disso, calculou-se a diferença entre a série interpolada e a original, considerando exclusivamente os pontos válidos. Finalmente, cada série original foi alinhada pela subtração da diferença mediana, Tabela 3. Isso foi necessário pela impossibilidade da comparação absoluta, por falta de um levantamento topográfico homogêneo entre todas as estações maregráficas.

Tabela 3 - Diferença altimétrica mediana entre UFRGS/CCMAR e demais marégrafos (em centímetros).

| Marégrafo  | Diferença (cm) |
|------------|----------------|
| FURG/CCMAR | 13,8           |
| SSN5       | 93,3           |
| Transpetro | 95,7           |
| Praticagem | 90,1           |
| Molhe Sul  | 16,1           |

Elaboração: Os autores (2025).

Convém salientar que as condições de medição entre os marégrafos são distintas, devido às diferentes técnicas de coleta. Tanto a régua quanto os sensores radar obtém valores pontuais para o nível da água. O GNSS-R, por outro lado, possui uma zona de abrangência da medição mais ampla, que está diretamente relacionada a elevação do satélite. Logo, a coleta com o sensor GNSS-R é realizada dentro de faixas distantes horizontalmente da antena, já os demais sensores coletam dados pontualmente no exato local de sua instalação. A exemplo, o sensor da FURG/CCMAR coleta os dados de nível pontualmente em um recuo do cais, como ilustrado na Figura 4. Em suma, a distinta forma de coleta, mesmo que em locais próximos, pode causar discrepâncias entre as medições devido ao comportamento da água ser influenciado por efeitos externos e distintos em cada local, como a reverberação da água que pode ocorrer devido a estrutura vertical construída (cais).

Figura 4 - Localização de UFRGS/CCMAR e FURG/CCMAR na Lagoa dos Patos, no norte da cidade de Rio Grande.



Elaboração: Os autores (2025).

### 3.4 Análise da dinâmica do nível da água

A comparação entre as séries temporais dos marégrafos convencionais e do sensor GNSS-R visou analisar o comportamento do nível da água entre os locais de cada sensor durante o evento extremo. A análise da dinâmica do nível da água durante a cheia de 2024 foi realizada em duas etapas: por comparação direta entre as séries temporais e por análise harmônica das constituintes de maré (Geremia-Nievinski et al., 2020).

Na análise comparativa direta, as séries foram sobrepostas ao longo do tempo. Para quantificar a

concordância entre as séries, calculou-se o desvio padrão das diferenças e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Por fim, um gráfico de dispersão foi gerado. Com isso, a dinâmica da água foi observada e comparada em diferentes pontos da cidade.

Na análise harmônica, inicialmente, todos os marégrafos tiveram os seus dados reamostrados ou dizimados para espaçamento de uma hora, que correspondia ao espaçamento original do sensor FURG/CCMAR. Como o objetivo foi analisar constituintes de maré com períodos de aproximadamente 24 horas, o intervalo de 1 h se mostrou adequado para tal finalidade, além de reduzir o consumo de memória na computação da transformada de Fourier. Posteriormente, foi necessário remover a variação de nível de baixa frequência, devida ao efeito hidrológico. A partir disso, foi possível calcular as constituintes de maré tendo como base apenas as oscilações de alta frequência, ou de curto período, mais representativas das forçantes astronômicas na hidrodinâmica. Sendo assim, suavizou-se a série deslizando uma média móvel de 7 dias. A série suavizada foi então subtraída da série original, resultando em uma série sem tendência. Ressalta-se que este procedimento foi realizado nas séries de todos os marégrafos.

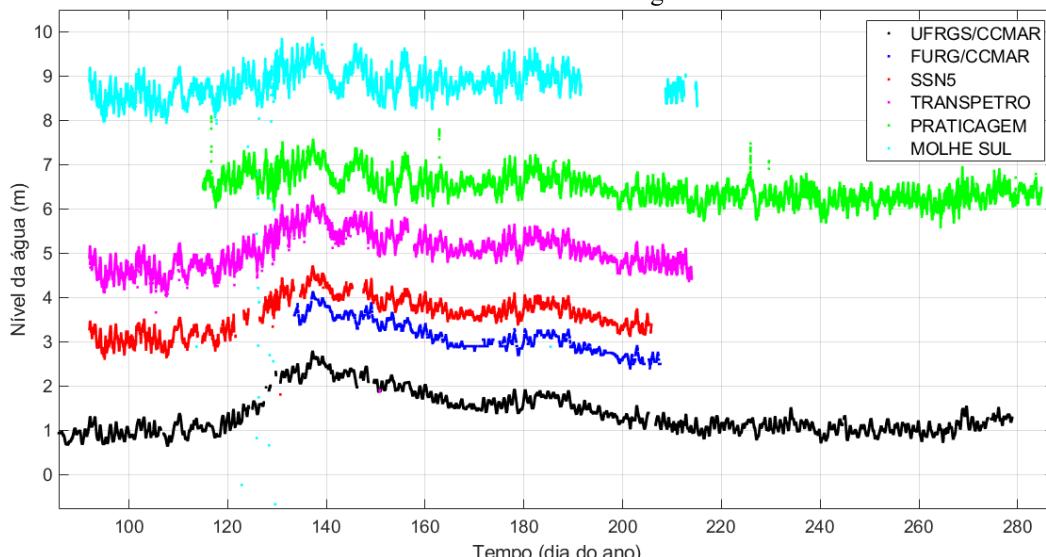
As duas análises, temporal e harmônica, auxiliaram no entendimento da propagação das ondas de maré e as interações locais, como a influência do vento, da pressão atmosférica e da geometria do estuário. A comparação entre marégrafos em diferentes pontos ao longo do estuário forneceu informações sobre os atrasos de fase, amplificações locais e efeitos dissipativos. Essa abordagem oferece mecanismos para avaliar as influências na variação do nível da água, melhorando a previsão e gestão da dinâmica costeira.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Comparação das séries temporais

Observa-se na Figura 5 a série temporal de todos os marégrafos. É notável o aumento do nível durante o evento catastrófico, onda de cheia, que acometeu o Rio Grande do Sul no mês de maio (por volta do dia 137). Em seguida, cada marégrafo foi comparado à série UFRGS/CCMAR, em pares com distância horizontal crescente (Figura 1).

Figura 5 - Séries temporais de todos os marégrafos; um deslocamento de 1,5m foi aplicado em cada série, apenas para melhorar a visibilidade neste gráfico.



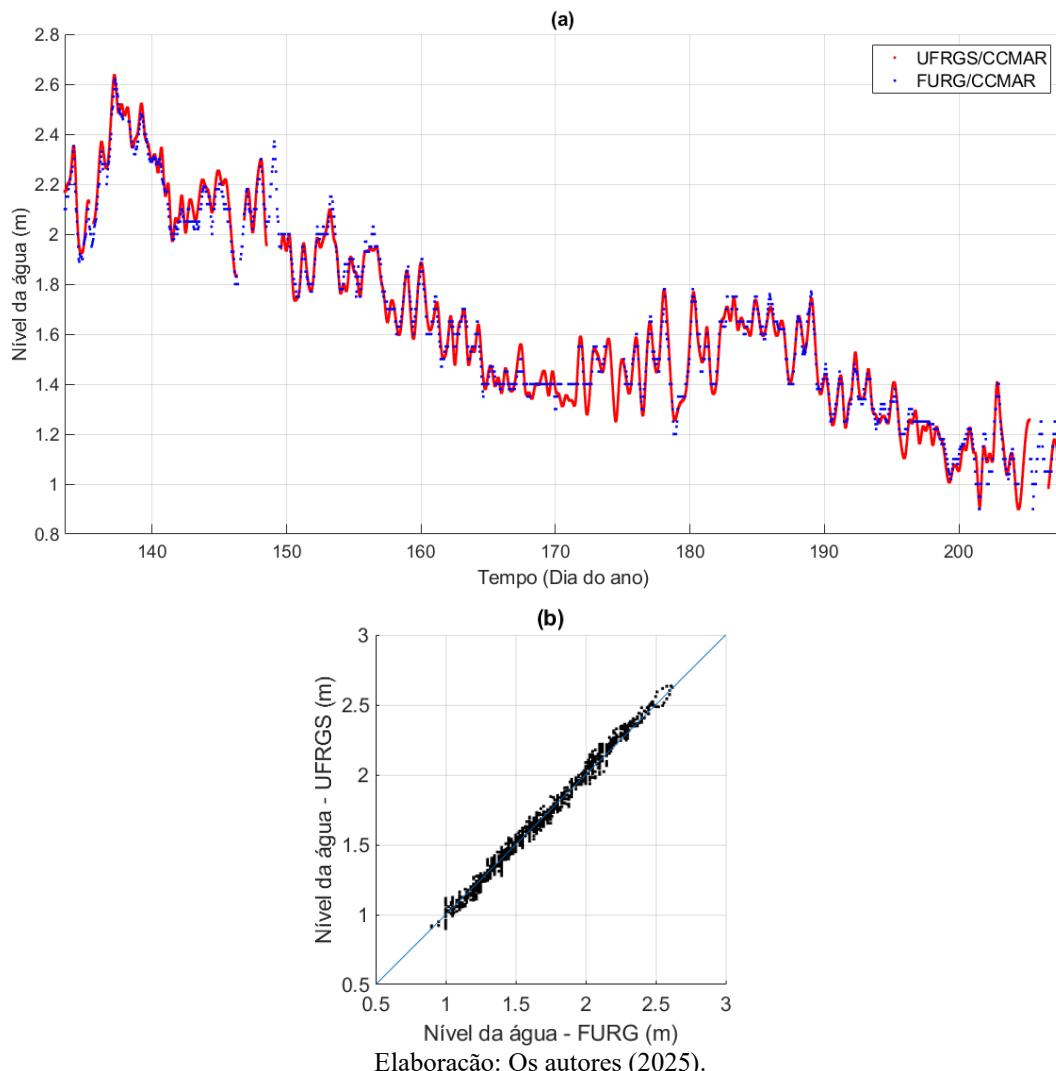
Elaboração: os autores (2025).

A Figura 6(a) evidencia a forte semelhança entre os níveis de água obtidos com os sensores UFRGS/CCMAR e FURG/CCMAR, distantes apenas 10m. A mesma figura mostra ainda que a série da FURG/CCMAR foi afetada por um período entre os dias 168 e 172, resultando em dados idênticos por horas, o que pode ser tão ou mais problemático do que a ausência de dados. A série da UFRGS/CCMAR também apresentou falhas, entre os dias 127 e 130, com pequenas retomadas nas medições durante o período. Esses resultados reforçam a importância da redundância de sensores instalados em um mesmo local, visando de

garantir a continuidade das séries temporais.

A Figura 6(b) exibe a dispersão dos níveis obtidos com as duas técnicas, com a maioria dos pontos concentrados na linha diagonal, resultando em um coeficiente de determinação igual a 0,99 e desvio padrão centimétrico (3,8 cm). Ainda que a régua tenha resolução numérica centimétrica, sua precisão ou repetibilidade não é especificada, considerando o procedimento fotogramétrico de leitura automática aplicado à câmera acoplada. O resultado da comparação entre as duas técnicas foi compatível com a validação anterior do sensor GNSS-R confrontado com radar em ambiente fluvial (Fagundes et al., 2021), onde foi obtido desvio padrão de 2,9 cm (em médias diárias).

Figura 6 - Séries temporais da UFRGS/CCMAR e da FURG/CCMAR (a) e gráfico de dispersão (b).



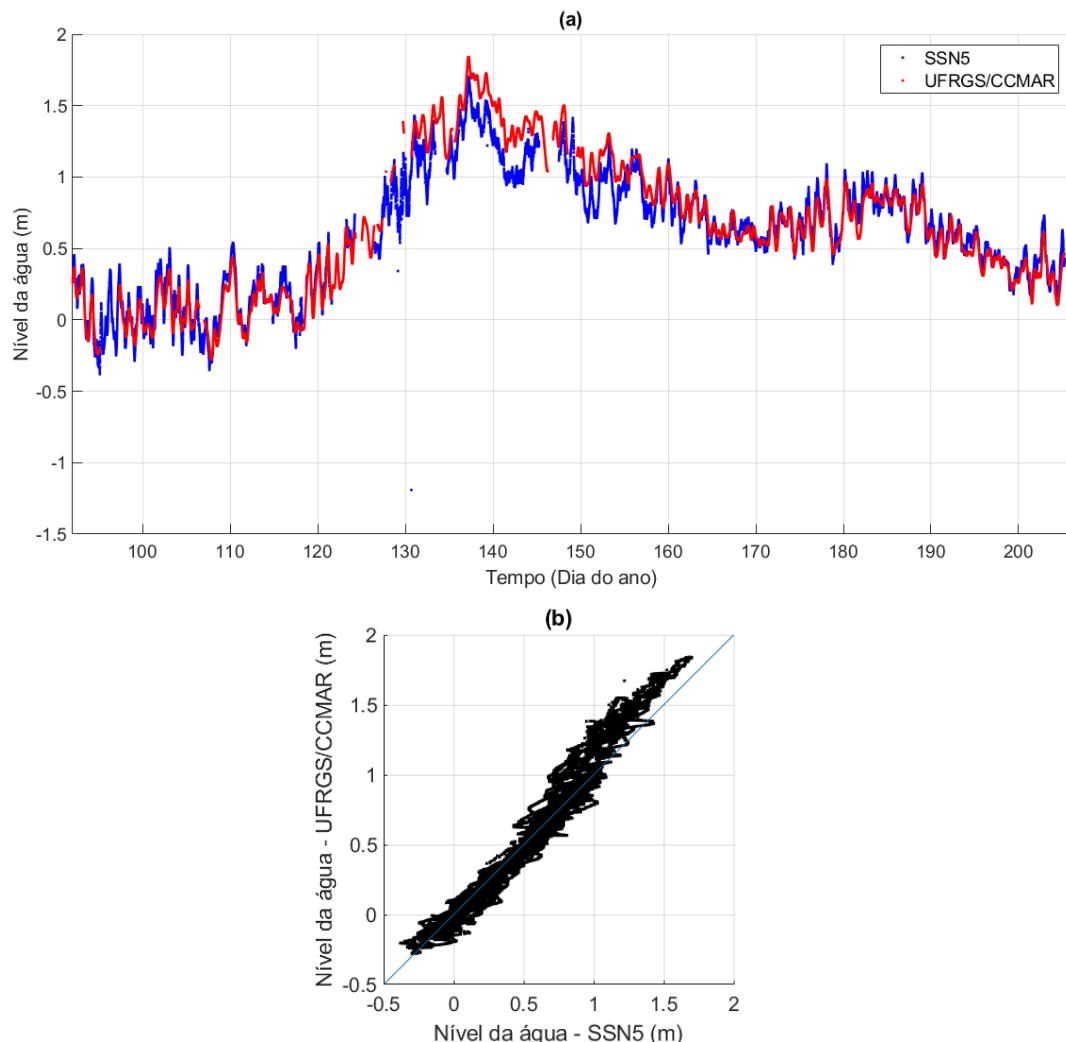
Elaboração: Os autores (2025).

Na comparação entre as séries temporais de UFRGS/CCMAR e SSN5, distantes 3 km, observou-se boa concordância no final de março e em grande parte de abril, vide Figura 7(a). Após esse período, o sensor convencional acarretou perda de dados nos dias 121 a 123, 124 a 126 e 133 a 134, com pequenas retomadas de funcionamento entre os períodos descritos. O período com maior falha contínua ocorreu entre os dias 145 e 147. A série do SSN5, com espaçamento de 5 minutos, apresentou oscilações de alta frequência, enquanto a GNSS-R, com espaçamento de 10 minutos, teve curvas mais suavizadas, com alguns valores extremos subestimados. Essa diferença entre os picos e vales pode ser causada pela amostragem altimétrica irregular no tempo e posterior suavização imposta pela *spline* no processamento refletométrico. A Figura 7(b) revela maior dispersão entre os dados de UFRGS/CCMAR e SSN5 em comparação à FURG/CCMAR, indicando discrepâncias devido ao distanciamento entre os sensores e a mudança no comportamento da água.

Após um pico de cheia (dia 137), as séries se descolaram, mas depois voltaram a se alinhar, demonstrando que o nível da água em UFRGS/CCMAR se manteve acima do nível em SSN5 durante a onda de cheia. Isso supõe que o procedimento empírico de alinhamento vertical das séries foi adequado (Tabela 3).

Logo, sugere-se que houve um desnível da água da Lagoa persistente entre os dois locais, influenciado pela grande descarga hidrológica do período, ou por ventos. É importante notar que SSN5 está localizada em uma ilhota adjacente à costa interior, o que pode causar reflexão e consequente reverberação das ondas. A ausência de dados em ambas as séries destaca, novamente, a importância de redundância dos sensores para garantir a continuidade dos dados. O coeficiente de determinação (0,98) e o desvio padrão (9,3 cm) indicaram boa concordância entre as séries. É importante frisar que o desvio padrão, praticamente decimétrico, apresentou um aumento significativo em comparação ao valor centimétrico da análise anterior, entre UFRGS/CCMAR e FURG/CCMAR.

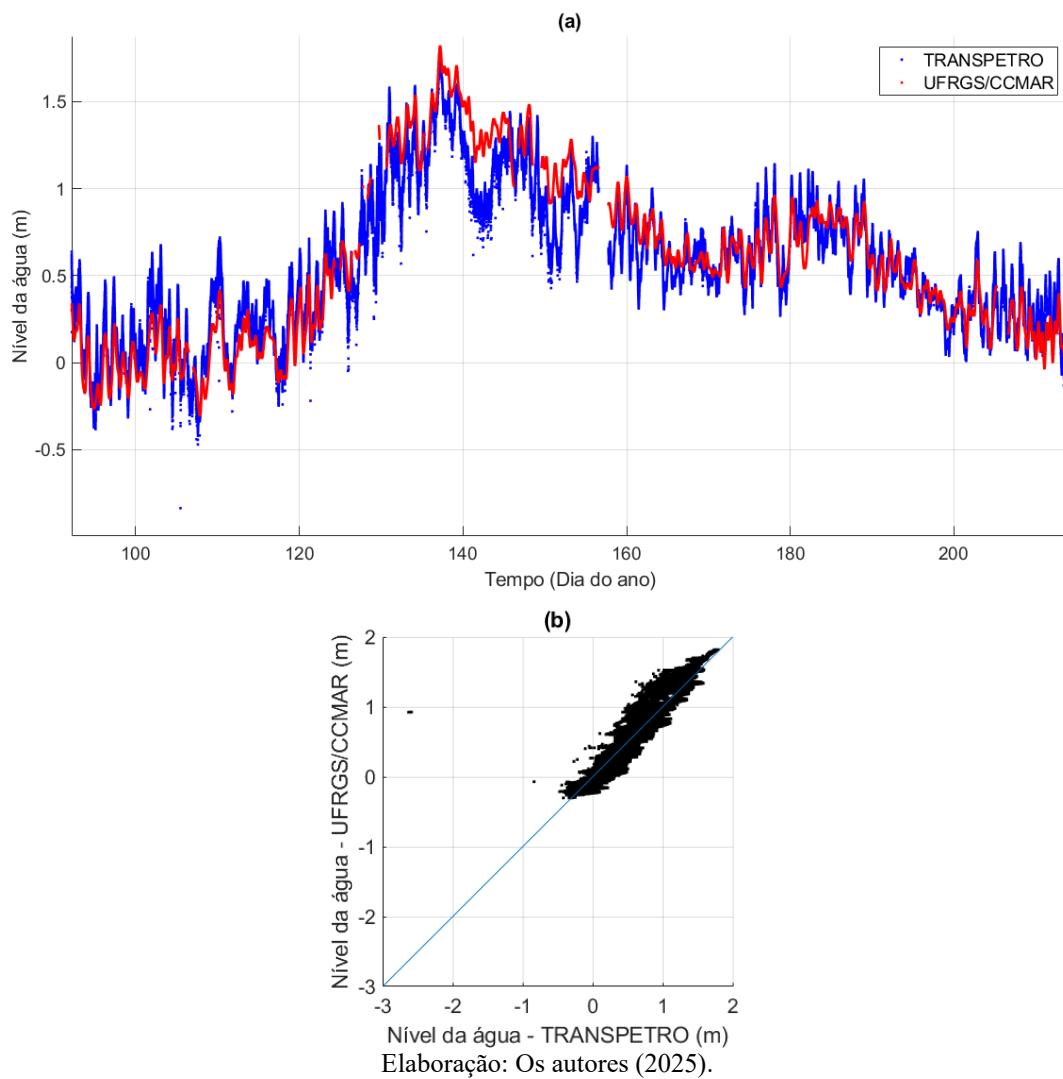
Figura 7 - Séries temporais da UFRGS/CCMAR e da SSN5 sobrepostas (a) e gráfico de dispersão (b).



Elaboração: Os autores (2025).

Na terceira comparação, foi investigada a relação entre os sensores UFRGS/CCMAR e Transpetro, distantes 8 km. O sensor da Transpetro apresentou uma falha durante o período analisado, mais precisamente entre os dias 156 e 157. Após o pico da cheia, as séries se descolaram, com a série da Transpetro mostrando uma descida mais abrupta do nível da água. A série temporal da Transpetro, conforme a Figura 8(a), apresentou mais variabilidade no nível da água quando comparada à série da UFRGS/CCMAR. A maior discrepância observada foi resultado do aumento da distância entre os marégrafos e da menor distância da estação Transpetro em relação ao mar. O gráfico de dispersão, Figura 8(b), mostrou a concentração dos pontos ao redor da linha diagonal, mas com impacto visível de alguns valores anômalos (*outliers*). As métricas indicaram um coeficiente determinação ligeiramente menor (0,95) e maior desvio padrão (14,5 cm) quando comparado à análise anterior.

Figura 8 - Séries temporais da UFRGS/CCMAR e da Transpetro sobrepostas (a) e gráfico de dispersão (b).

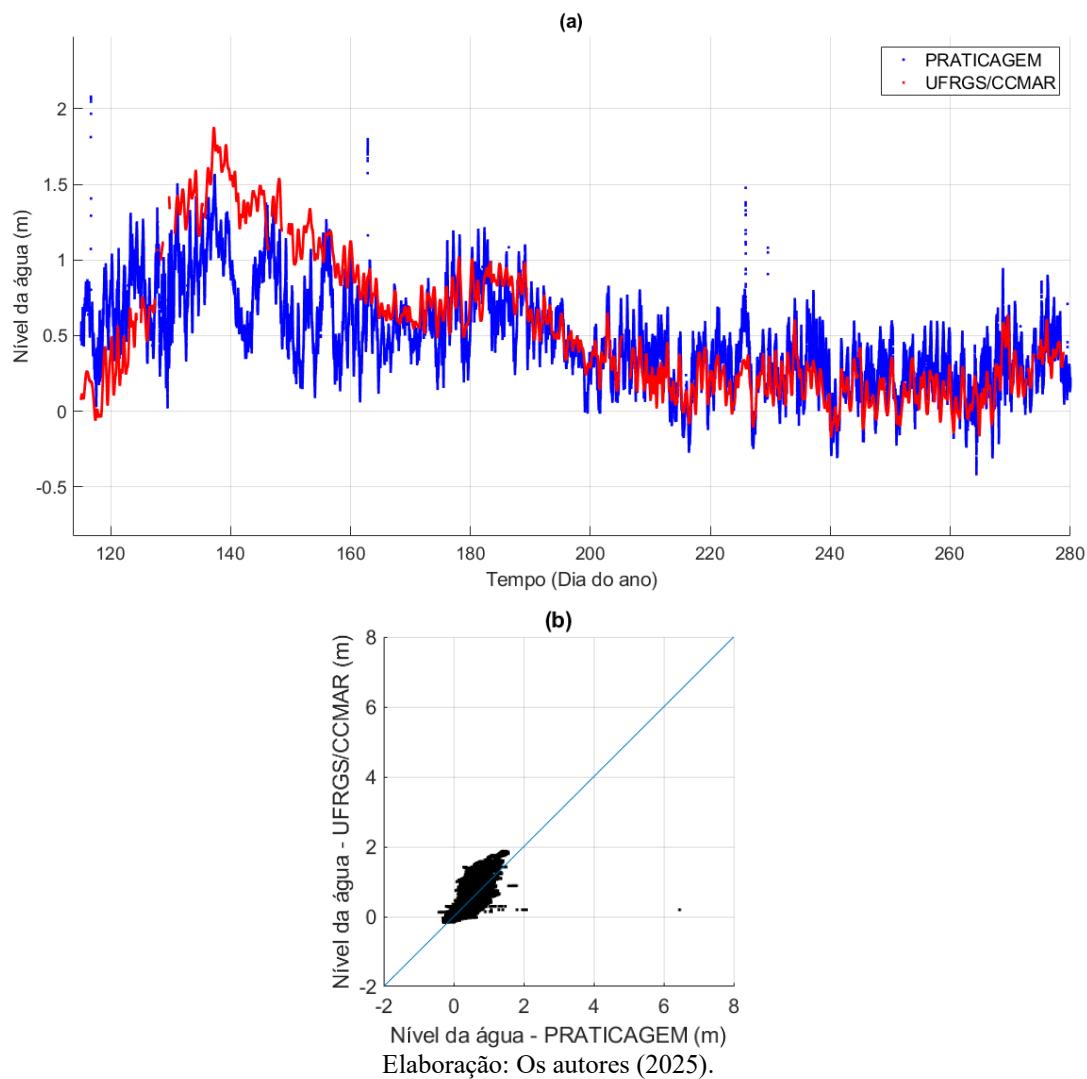


Elaboração: Os autores (2025).

As séries temporais da UFRGS/CCMAR e da Praticagem, distantes 16 km, demonstraram concordância menor do que as análises anteriores, com variações significativas entre os dias 120 e 160. As séries observadas na Figura 9(a), tiveram maiores discrepâncias absolutas nos primeiros 50 dias, possivelmente devido a efeitos do evento extremo. Após o dia 200, as discrepâncias estabilizaram, indicando uma boa concordância entre os sensores. Este período após a cheia estava disponível apenas na série da Praticagem e não nos demais marégrafos convencionais. Contudo, vale mencionar a maior variação da água no local do sensor da Praticagem, mostrando que o sensor registrou maiores alterações de nível. Isto se deve às características da água na região e o espaçamento temporal do sensor, que permite detectar oscilações de maior frequência. Em termos estatísticos, o coeficiente de determinação (0,78) indicou uma correspondência menor e o desvio padrão (22,5 cm) apontou discrepâncias na ordem do decímetro. O desvio padrão elevado sugeriu alta dispersão das discrepâncias, Figura 9(b), refletindo a variabilidade do comportamento da água.

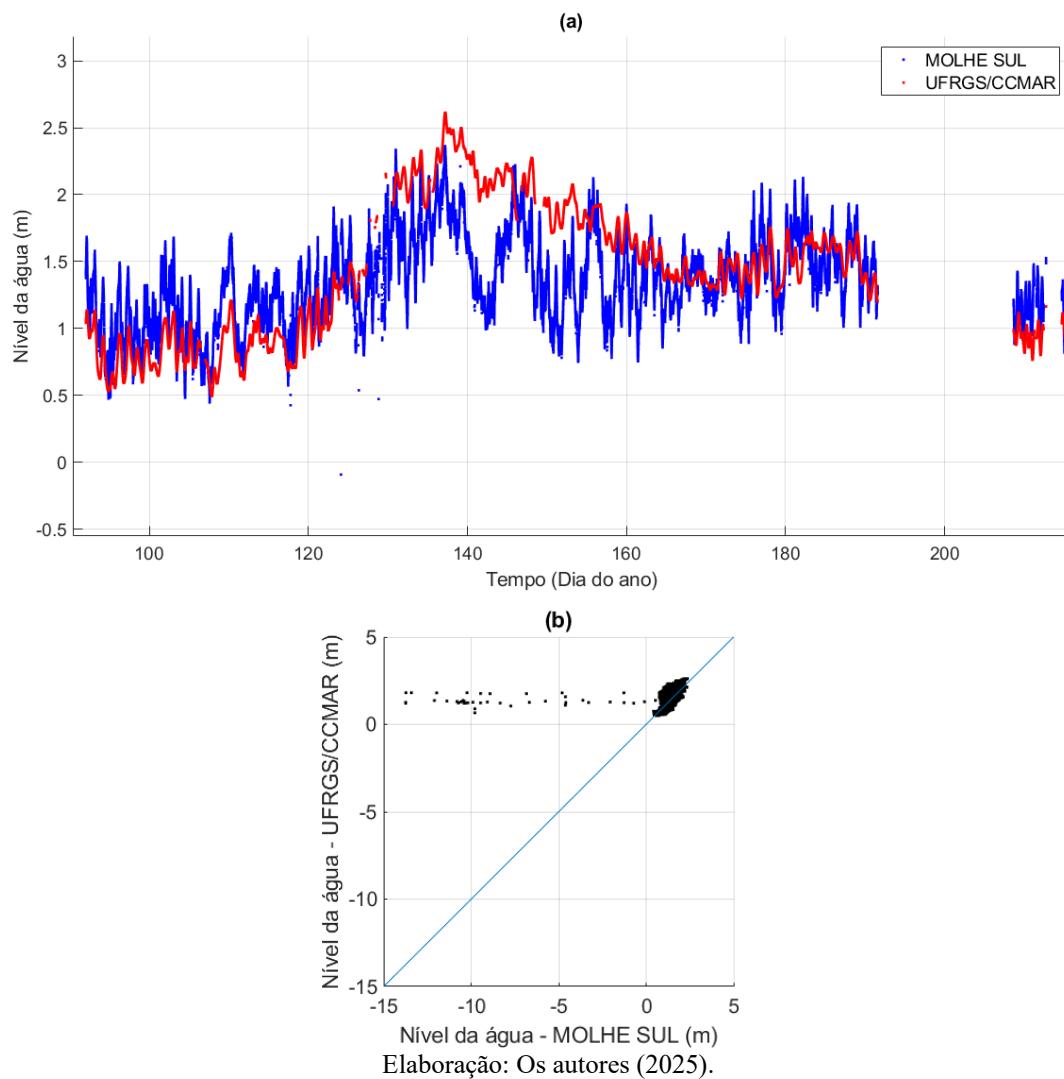
A estabilização das discrepâncias após o evento extremo sugeriu que as séries apresentaram medições mais consistentes e correlacionadas ao longo do tempo, embora seja, ainda, a comparação mais discrepante em relação às análises anteriores. Há também valores anômalos, visíveis tanto no gráfico de dispersão quanto na série temporal, próximo aos dias do ano 120, 160 e 230. As anomalias são positivas na série da Praticagem, sugerindo que possam ser causadas por obstruções passageiras entre o radar e a água.

Figura 9 - Séries temporais da UFRGS/CCMAR e da Praticagem sobrepostas (a) e gráfico de dispersão (b).



Observa-se na Figura 10 as séries temporais de UFRGS/CCMAR e Molhe Sul, distantes 20 km. É possível notar uma discrepância acentuada, com destaque para a maior variabilidade da água na região do Molhe Sul. Esta análise revelou a coeficiente de determinação (0,62), o mais baixo em comparação a todas as análises. O gráfico de dispersão mostra a presença de muito ruído, vide Figura 10(b). Isso indica que a dinâmica da água é significativamente diferente entre os dois locais. O desvio padrão de 35,5 cm aponta grande discrepância entre as séries, em especial próximo ao dia 140. Esses resultados eram esperados visto que o sensor do Molhe Sul, localizado no mar, está em uma região com dinâmica diferente do marégrafo UFRGS/CCMAR, afetando as medições e dificultando a comparação.

Figura 10 - Sériess temporais da UFRGS/CCMAR e do Molhe Sul sobrepostas (a) e gráfico de dispersão (b).



Elaboração: Os autores (2025).

#### 4.1.1 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS TEMPORAIS

As comparações entre os locais com o GNSS-R e com os sensores convencionais indicaram concordância aproximadamente inversamente proporcional à distância, mas com variações conforme a localização e as condições de medição. Com o aumento da distância entre os sensores, houve uma diminuição no valor de coeficiente de determinação e um aumento no desvio padrão, conforme Figura 11. As maiores discrepâncias absolutas tenderam a ocorrer durante o pico da onda de cheia (dia 140). A comparação entre as estações coincidentes apresentou diferenças centimétricas, reforçando a precisão relativa entre as técnicas GNSS-R e da régua (com câmera), apesar de falhas pontuais nos sensores.

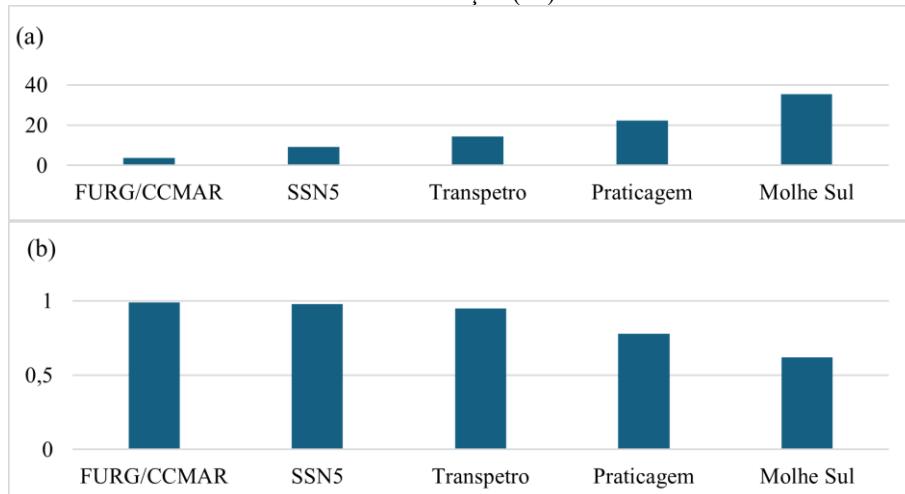
A comparação com SSN5 mostrou maior dispersão e menor coeficiente de determinação do que a comparação com FURG/CCMAR. O menor espaçamento temporal do SSN5 captou oscilações de alta frequência não registradas pelo GNSS-R, contudo as séries obtiveram ótimo coeficiente de determinação. Após um pico de cheia, as séries divergiram por um período, refletindo diferentes respostas à variação do nível da água nos diferentes locais.

A série da Transpetro apresentou dispersão logo após a onda de cheia causada pelo evento extremo, com o sensor registrando uma descida mais rápida do nível da água. O sensor da Praticagem demonstrou menor concordância com o GNSS-R após o evento extremo quando comparado às análises anteriores. Ao observar o gráfico de sobreposição das séries temporais, percebe-se maior variabilidade da água na região da Transpetro, o que resultou em discrepâncias mais elevadas.

A maior divergência foi observada no Molhe Sul, evidenciando diferenças significativas na dinâmica da água em relação ao GNSS-R, devido à localização do marégrafo ser nos Molhes da Barra, coletando o dado no mar. Os resultados ressaltaram a influência da hidrodinâmica local nas medições e a importância de

múltiplos sensores para garantir a continuidade e confiabilidade dos dados em diferentes pontos da cidade.

Figura 11 - Estatísticas entre UFRGS/CCMAR e demais marégrafos: (a) desvio padrão e (b) coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

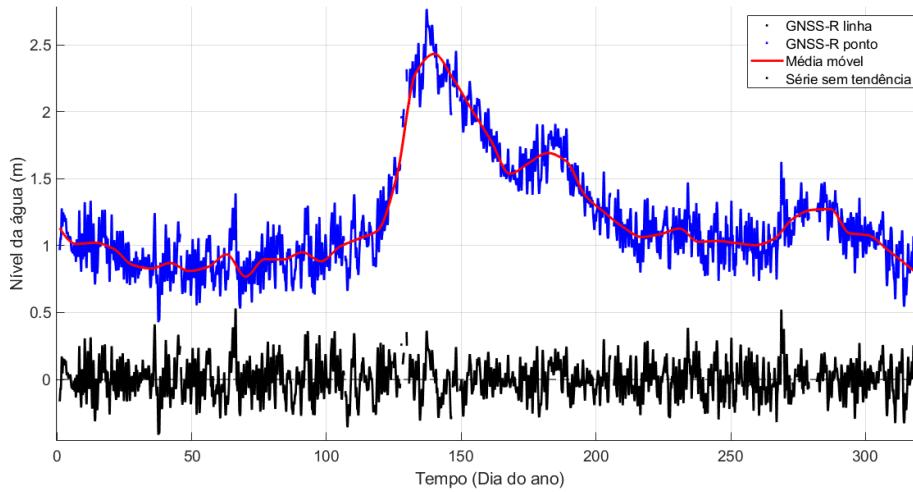


Elaboração: Os autores (2025).

#### 4.2 Comparação das constituintes de maré

A Figura 12 mostra o gráfico de remoção da onda de cheia no sensor GNSS-R. Nota-se que a utilização da média móvel de 7 dias foi suficiente para remover a tendência da série original, restando oscilações de alta frequência, resultantes de forçantes astronômicas e meteorológicas.

Figura 12 - Gráfico de remoção da onda de cheia. Série temporal original (azul), média móvel de 7 dias (vermelho) e resultado sem tendência (preto).



Elaboração: Os autores (2025).

A Tabela 4 apresenta os resultados das constituintes estatisticamente significativas: lunisolar diurna (K1; período  $T = 23,9$  h) e lunar diurna (O1;  $T = 25,8$  h) em cada um dos marégrafos. Observa-se para K1 que a régua da FURG/CCMAR apresenta a menor diferença de amplitude em relação ao sensor UFRGS/CCMAR, o que é esperado, dada a proximidade das estações. No entanto, a análise de fase de K1 mostra uma diferença de cerca de 13 graus entre UFRGS/CCMAR e FURG/CCMAR. Consequentemente, a diferença vetorial também foi impactada. As diferenças encontradas em K1 e O1 podem ser atribuídas a diversos fatores, como a pequena duração das séries, a técnica de medição e a interação entre a onda de maré e as características locais, como as bordas do estuário e a presença de estruturas artificiais. Essas diferenças ajudam a entender os efeitos locais sobre a propagação da onda de maré e a importância da escolha adequada de métodos de filtragem e ajuste de séries temporais na análise de marés.

A descrição das Tabela 5 e Tabela 6 detalha as comparações entre as fases e amplitudes das ondas de diferentes marégrafos em relação ao marégrafo de referência UFRGS/CCMAR, com foco nas constituintes K1 e O1. Para melhorar a compreensão e facilitar a análise visual dos resultados numéricos, aponta-se que a diferença vetorial sugere que há uma combinação de efeitos sistemáticos e possivelmente interferências locais que afetam a onda de maré. Pequenas diferenças individuais em amplitude e fase podem se combinar de forma não linear, amplificando a diferença vetorial total. Isso ocorre porque o erro total é influenciado pelos vetores defasados e não apenas por suas magnitudes.

Tabela 4 - Resultados das constituintes de maré, O1 e K1, em amplitude (Amp) e fase para cada marégrafo.

| Constituinte | UFRGS/CCMAR | FURG/CCMAR            | SSN5                  | Transpetro            | Praticagem            | Molhe Sul             |
|--------------|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Símbolo      | Período (h) | Amp. (cm)<br>Fase (°) |
| K1           | 23,9        | 3,6<br>175,2          | 3,2<br>161,5          | 4,3<br>180,0          | 4,1<br>177,7          | 4,9<br>138,8          |
| O1           | 25,8        | 7,8<br>126,8          | 5,8<br>132,7          | 8,6<br>140,8          | 9,7<br>147,9          | 12,5<br>113,7         |

Elaboração: Os autores (2025).

Tabela 5 - Métricas para a constituinte harmônica K1 com relação à estação UFRGS/CCMAR.

|            | Duração da série temporal (dias) | Diferença de amplitude (cm) | Diferença relativa de amplitude (%) | Diferença de fase (graus) | Diferença relativa de fase (%) | Diferença vetorial combinada (cm) | Diferença vetorial relativa (%) |
|------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| FURG       | 73                               | +0,4                        | +9,9                                | +13,7                     | +3,8                           | 0,9                               | 24,7                            |
| SSN5       | 113                              | -0,7                        | -20,1                               | -4,8                      | -1,3                           | 0,8                               | 22,1                            |
| Transpetro | 122                              | -0,6                        | -16,5                               | -2,5                      | -0,7                           | 0,6                               | 17,2                            |
| Praticagem | 163                              | -1,4                        | -38,3                               | +36,4                     | +10,1                          | 2,9                               | 82,8                            |
| Molhe Sul  | 99                               | -3,3                        | -93,7                               | -23,9                     | -6,6                           | 3,9                               | 109,9                           |

Elaboração: Os autores (2025).

Tabela 6 - Métricas para a constituinte harmônica O1 com relação à estação UFRGS/CCMAR.

|            | Duração da série temporal (dias) | Diferença de amplitude (cm) | Diferença relativa de amplitude (%) | Diferença de fase (graus) | Diferença relativa de fase (%) | Diferença vetorial combinada (cm) | Diferença vetorial relativa (%) |
|------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| FURG       | 73                               | +1,9                        | +24,8                               | -5,9                      | -1,6                           | 2,0                               | 26,4                            |
| SSN5       | 113                              | -0,8                        | -10,8                               | -14,0                     | -3,9                           | 2,2                               | 27,8                            |
| Transpetro | 122                              | -1,9                        | -25                                 | -21,1                     | -5,9                           | 3,7                               | 47,9                            |
| Praticagem | 163                              | -4,7                        | -60,7                               | +13,1                     | +3,6                           | 5,2                               | 67,2                            |
| Molhe Sul  | 99                               | -6,1                        | -79,3                               | -34,5                     | -9,6                           | 8,7                               | 112,3                           |

Elaboração: Os autores (2025).

#### 4.2.1 DISCUSSÃO SOBRE AS CONSTITUINTES DE MARÉ

O comportamento da maré durante o evento extremo reflete a complexidade das interações hidrodinâmicas no estuário com o mar, com a influência significativa dos ventos e da descarga fluvial. Destaca-se a inversão de sinal na diferença de fase para a série da Praticagem, o que se especula ser devido ao longo período pós-enchente com dados para esta estação, comparado com os demais marégrafos convencionais. O Molhe Sul, que está mais próximo da desembocadura da Lagoa dos Patos, apresenta um atraso de fase para as constituintes K1 e O1. Esse atraso pode ser explicado por efeitos como a reflexão da onda de maré e a interação com forçantes meteorológicas. A descarga hidrológica e os ventos podem ter direcionado a água, e resultaram em uma resistência adicional ao fluxo de maré.

Nesse contexto, a amplitude da maré parece reduzida espacialmente nas regiões mais internas do estuário, o que é esperado independente da onda de cheia, mas pode ter sido intensificado devido ao aumento do nível da água. Ainda em relação à amplitude, verificou-se que apenas a onda registrada na estação FURG/CCMAR apresentou valores inferiores aos da UFRGS/CCMAR, resultando em uma diferença positiva tanto para O1 quanto para K1. Em todas as demais análises, a amplitude foi maior nos outros locais em

comparação à UFRGS/CCMAR.

As análises de O1 mostram que os marégrafos mais distantes de UFRGS/CCMAR apresentam maiores diferenças vetoriais relativas. Essa diferença pode ser explicada por fatores como a morfologia do estuário, a técnica de coleta dos dados e até mesmo o impacto durante o evento extremo. Já para K1, a diferença vetorial relativa foi significativamente maior nos dois marégrafos mais distantes (Praticagem e Molhe Sul), porém não segue uma tendência linear entre FURG, SSN5 e Transpetro. Dentre a comparação dessas estações com UFRGS/CCMAR, a estação Transpetro mostrou a menor diferença vetorial relativa, seguida de SSN5 e FURG/CCMAR. Pode-se inferir que a diferença vetorial de K1 foi menor quanto maior a duração da série temporal nos três marégrafos mais próximos de UFRGS/CCMAR. Isso demonstra a complexidade da análise do comportamento da água no local, apontando que componentes com períodos distintos são afetados de diferentes formas por fatores lineares e não lineares.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

As tecnologias convencionais de medição de nível da água enfrentam desafios relacionados à sua instalação e manutenção. Nesse contexto, a técnica de refletometria via satélites de navegação (GNSS-R) oferece uma alternativa para o monitoramento do nível da água, especialmente durante eventos extremos, pela vantagem de permitir a medição à distância.

Neste trabalho, estudamos a dinâmica do nível da água no estuário de Rio Grande (RS) junto à Lagoa dos Patos, durante a cheia de maio de 2024. Foram empregados todos os marégrafos, convencionais e GNSS-R, existentes e com dados disponíveis na região. A comparação temporal entre pares de marégrafos mostrou que quanto maior a distância entre os sensores, mais a dinâmica relativa da água é alterada, confirmando a expectativa inicial. As estatísticas revelaram que os sensores mais distantes, como o Molhe Sul, apresentaram maior variabilidade nos resultados, possivelmente devido à maior influência de forçantes astronômicas e meteorológicas.

A análise harmônica demonstrou que a energia da onda de maré pode se propagar por diferentes trajetos, resultando em defasagens ou atrasos de fase. Isso pode impactar a amplitude da maré e os cálculos das fases harmônicas, especialmente em constituintes de maior período. A análise de fase também revelou que a proximidade dos marégrafos não é o único fator determinante para as discrepâncias observadas, sendo as condições hidrodinâmicas locais um fator relevante. O estudo da diferença entre as amplitudes e fases de cada constituinte, especialmente a relação entre o marégrafo UFRGS/CCMAR e outras estações, revelou importantes informações sobre as características locais dos sensores e a influência da proximidade com o mar e de estruturas artificiais.

Cabe ainda enfatizar que a instalação redundante de múltiplos sensores em locais muito próximos foi essencial para garantir a continuidade das medições em caso de falha de um dos sensores. Isso demonstrou que a técnica de refletometria GNSS para maregrafia é viável quando comparada às técnicas convencionais, permitindo que a série temporal seja continuada durante a ocorrência de eventos extremos. Contudo, pesquisas adicionais são necessárias para melhorar sua precisão, quando comparada à precisão nominal dos sensores radar. Entretanto, cabe destacar que mesmo os dados dos sensores convencionais apresentaram anomalias.

Recomenda-se instalar sensores adicionais em locais adjacentes, já que as variações se mostraram significativas de um ponto para outro. Isso é especialmente válido em ambientes como o estuário da Lagoa dos Patos, onde a topografia, a batimetria e outros fatores locais influenciam o comportamento da maré. Além disso, a instalação de sensores em locais ainda desocupados contribuiria para uma cobertura mais abrangente.

Recentemente, o sensor GNSS-R foi atualizado para inclusão do rastreamento da constelação russa GLONASS. Recomenda-se investigar o impacto do sensor Multi-GNSS, em especial na resolução temporal das medições altimétricas. Também sugere-se analisar o impacto da correção para velocidade vertical da água (Larson, Nievinski, & Freymueller, 2013), normalmente desprezível em ambientes de pequena amplitude de maré, considerando especialmente os momentos de variação mais abrupta do nível da água.

Sugere-se um estudo da maré em um período mais longo, idealmente o mesmo intervalo para todos os marégrafos, para estimação mais precisa e consistente dos constituintes astronômicos em cada marégrafo. Indica-se também a consideração da incerteza das constituintes, para avaliar se a diferença é significativa ou

desprezível. A análise das demais estações na Lagoa dos Patos, fora do estuário de Rio Grande, também deve revelar informações sobre a onda de cheia. A avaliação da maré fora do período de cheia permitirá avaliar quais variações espaciais são persistentes e qual é a influência da própria cheia.

Por fim, orienta-se a realização de um levantamento topogeodésico para calibração dos zeros hidrográficos de todos os marégrafos, com o objetivo de verificar o viés ou discrepância média entre as medições de diferentes estações. Isso ajudaria a garantir a acurácia das medições relativas e permitiria a inferência da inclinação da superfície da água, essencial para o monitoramento adequado da dinâmica do nível da água no estuário.

## Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGSR/UFRGS). À Portos RS, pelo compartilhamento dos dados coletados com os medidores convencionais instalados em Rio Grande. À TideSat, pelo fornecimento dos dados obtidos com o sensor GNSS-R.

## Contribuição dos autores

Conceptualização: Fagundes, M. A. R e Geremia-Nievinski, F; Curadoria dos Dados: Fagundes, M. A. R; Análise Formal e Investigação: Fagundes, M. A. R e Geremia-Nievinski, F. Metodologia: Geremia-Nievinski, F; Supervisão: Geremia-Nievinski, F; Redação -minuta inicial: Fagundes, M. A. R; Redação - revisão e edição: Fagundes, M. A. R e Geremia-Nievinski, F.

## Conflitos de interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesse.

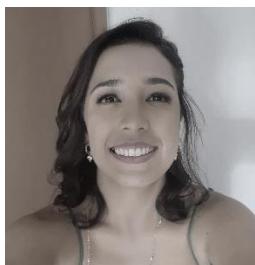
## Referências

- Carrillo, D. P. (2024). Medição emergencial nível do Guaíba durante enchente de 2024—Parte 2 (Informação técnica 21; p. 2). Secretaria Estadual do Meio Ambiente e Infraestrutura, Governo do Estado do Rio Grande do Sul.
- Fagundes, M. A. R., Mendonça-Tinti, I., Iescheck, A. L., Akos, D. M., & Geremia-Nievinski, F. (2021). An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: Design and long-term validation towards sea level altimetry. *GPS Solutions*. 25(2), 73 <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01087-1>
- Fagundes, M. A. R., Yamawaki, M. K., Almeida, J., V. H., Leipelt, D. B., Tinti, I. M., & Geremia-Nievinski, F. (2021). TideSat - uma startup de sensoriamento remoto geodésico. *X Seminário Anual de Pesquisas em Geodésia da UFRGS-2021*, 24–28. <http://hdl.handle.net/10183/231112>
- Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Rüdiger Haas, Wei Liu, Joakim Strandberg, Sajad Tabibi, Sibylle Vey, Jens Wickert, & Simon Williams. (2020). SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry – Results from the first IAG inter-comparison campaign. *Journal of Geodesy*. 94(8), 70. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01387-3>
- Geremia-Nievinski, F. (2023). Low-Cost Ground-Based GNSS Reflectometry. In M. G. Sideris (Ed.), *Encyclopedia of Geodesy* (pp. 1–5). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0\\_175](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02370-0_175)
- Geremia Nievinski, F., Toldo, E., Puhl, E., MANICA, R., Rodrigues Nunes, J. C., Fick, C., Scottá, F., & Silva da Silva, T. (2024). *Aferição emergencial da medição do nível da água durante a cheia de 2024 em Porto Alegre*. [Nota técnica] Programa de Gestão Ambiental do Porto de Porto Alegre; Portos RS e Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.14526745>
- Holden, L. D. & Larson, K. M. (2021). Ten years of Lake Taupō surface height estimates using the GNSS interferometric reflectometry. *Journal of Geodesy*, 95(7), 74. <https://doi.org/10.1007/s00190-021-01523->

- Intergovernmental Oceanographic Commission [IOC]. (2006). *Manual on sea-level measurements and interpretation – Volume IV: An update to 2006* (IOC Manuals and Guides No. 14, Vol. IV; JCOMM Technical Report No. 31; WMO/TD No. 1339). UNESCO. [https://psmsl.org/train\\_and\\_info/training/manuals/manual\\_14\\_final\\_21\\_09\\_06.pdf](https://psmsl.org/train_and_info/training/manuals/manual_14_final_21_09_06.pdf)
- Larson, K. M. (2016). GPS interferometric reflectometry: Applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 775–787. <https://doi.org/10.1002/wat2.1167>
- Larson, K. M. (2024). Gnssrefl: An open source software package in python for GNSS interferometric reflectometry applications. *GPS Solutions*, 28(4), 165. <https://doi.org/10.1007/s10291-024-01694-8>
- Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*, 17(1), 41–52. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G., & Freymueller, J. T. (2013). The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5), 1200–1204. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>
- Larson, K. M., Ray, R. D., & Williams, S. D. P. (2017). A 10-Year Comparison of Water Levels Measured with a Geodetic GPS Receiver versus a Conventional Tide Gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(2), 295–307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>
- Lei nº 14.746, de 5 de dezembro de 2023. (2023). Confere o título de Capital Nacional das Águas ao Município de Rio Grande, no Estado do Rio Grande do Sul. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2023-2026/2023/lei/L14746.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/L14746.htm)
- Marcuzzo, F. F. N., Kenup, R. E., Zanetti, H. P., Benvenutti, L., Oliveira, M. P. de, Wilson, E. da S., Acosta, C. C., & Bao, R. (2024). *Aferição direta e avaliação indireta do nível máximo de rios em estações fluviométricas e marcas de inundação no Rio Grande do Sul na grande cheia de maio de 2024*: 9. Versão (p. 63) [Nota técnica]. Serviço Geológico do Brasil. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/24939.11>
- Mario, H. F. de S. (2023). Levantamento hidrográfico do Porto de Rio Grande - pedido de medição de 10 de março de 2023. (Serviços de batimetria realizados para atendimento do contrato RG.1206/22 Porto de Rio Grande) [Relatório técnico]. Spectrah Oceanografia e Meio Ambiente.
- Marques, W. C., & Möller, O. O. (2008). Variabilidade temporal em longo período da descarga fluvial e níveis de água da Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 13(3), 155–163. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v13n3.p155-163>
- Míguez, B. M., Testut, L., & Wöppelmann, G. (2012). Performance of modern tide gauges: Towards mm-level accuracy. *Scientia Marina*, 76(S1), 221–228. <https://doi.org/10.3989/scimar.03618.18A>
- Nievinski, F. G., & Larson, K. M. (2014). Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications. *GPS Solutions*, 18(2), 309–322. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0331-y>
- Nogueira, R. M. (2006). *Aspectos hidrodinâmicos da Lagoa dos Patos na formação do depósito lamítico ao largo da praia de Cassino – RS* [Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. [https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno\\_upl//THESIS/10001728/2006\\_mestrado\\_raphael\\_miguez\\_nogueira\\_20210819151712523.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufrj-peno_upl//THESIS/10001728/2006_mestrado_raphael_miguez_nogueira_20210819151712523.pdf)
- Oliveira, M. P. (2008). *Análise dos parâmetros meteorológicos e oceanográficos de um evento de maré meteorológica ocorrido em Tramandaí—Rio Grande do Sul* [Trabalho de Conclusão de curso - Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/17346>
- Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL). (2019). *Report of the PSMSL and GLOSS Group of Experts meeting XVI (PSMSL Report No. 3)*. National Oceanography Centre. [https://psmsl.org/about\\_us/other\\_reports/PSMSL\\_GE-GLOSS\\_XVI\\_2019.pdf](https://psmsl.org/about_us/other_reports/PSMSL_GE-GLOSS_XVI_2019.pdf)
- Prestes, L. D., Silva, T. S. da., Brentano, T. B., Aquino, N. de., Filgueras, A. S., Oliveira, M. A. de., Ruiz, A. C., Silva, D. F. da., Sfredo, G. A. e Onetti, J. G. (2021). Gestão ambiental no porto de Porto Alegre, Sul do Brasil: uma abordagem ecossistêmica. 2023. *X Congresso sobre Planejamento e Gestão de Zonas*

- Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/358265711>
- Purnell, D., Gomez, N., Chan, N. H., Strandberg, J., Holland, D. M., & Hobiger, T. (2020). Quantifying the Uncertainty in Ground-Based GNSS-Reflectometry Sea Level Measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 4419–4428.
- Purnell, D., Gomez, N., Minarik, W., & Langston, G. (2024). Real-Time Water Levels Using GNSS-IR: A Potential Tool for Flood Monitoring. *Geophysical Research Letters*, 51(5), e2023GL105039. <https://doi.org/10.1029/2023GL105039>
- Roesler, C., & Larson, K. M. (2018). Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR). *GPS Solutions*, 22(3). <https://doi.org/10.1007/s10291-018-0744-8>
- Strandberg, J., Hobiger, T., & Haas, R. (2016). Improving GNSS-R sea level determination through inverse modeling of SNR data. *Radio Science*, 51(8), 1286–1296. <https://doi.org/10.1002/2016RS006057>
- Torres, L. H. (2012). Águas de maio: a enchente de 1941 em Rio Grande. *Historiae (Rio Grande)*, 3(3), p. 239-254. Disponível em: <https://biblat.unam.mx/es/revista/historiae-rio-grande/2>.
- Universidade Federal do Rio Grande - FURG. (2024). FURG disponibiliza transmissão do nível da Lagoa dos Patos em tempo real. <https://www.furg.br/noticias/noticias-institucional/furg-disponibiliza-transmissao-do-nivel-da-lagoa-dos-patos-em-tempo-real>.
- Valente, R. de M., Silva, J. M. C. da, Straube, F. C., & Nascimento, J. L. X. do. (2011). *Conservação de Aves Migratórias Neárticas no Brasil* (1<sup>a</sup> ed., Vol. 1), Conservação Internacional.

## Biografia do autor principal



Manuella Anaís Rodrigues Fagundes, natural de Porto Alegre, 1992. Engenheira Cartógrafa e Doutora em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. Atualmente é professora adjunta no Departamento de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal de Pernambuco. Tem interesse por pesquisas na área de Refletometria GNSS (GNSS-R) e Cartografia.



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.