

INUNDAÇÕES DE 2024 NO RIO GRANDE DO SUL: UMA ABORDAGEM COM DADOS DE RADAR E ANÁLISE DE PRECIPITAÇÃO

Kaio Sales de Tancredo Nunes

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande
Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de
Feira de Santana (UEFS), Departamento de Tecnologia (DTEC)
E-mail: kaioaleseng@gmail.com

Susane Eterna Leite Medeiros

Doutora em Física pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UEFS, Departamento de
Tecnologia (DTEC)
E-mail: selmedeiros@uefs.br

Patricia dos Santos Nascimento

Doutora em Agronomia (Irrigação e Drenagem) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
UNESP
Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UEFS, Departamento de
Tecnologia (DTEC)
E-mail: psnascimento@uefs.br

Deorgia Tayane Mendes de Souza

Doutora em Geociências Aplicada e Geodinâmica pela Universidade de Brasília-UnB
Professora do Programa de Pós-Graduação em Modelagem e Ciência da Terra – UEFS, Departamento de
Ciências Exatas (DEXA)
E-mail: dtmsouza@uefs.br

Rosângela Leal Santos

Doutora em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo
Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – UEFS, Departamento de
Tecnologia (DTEC)
E-mail: rosaleal@uefs.br

123

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo mapear as áreas afetadas por eventos de inundação ocorridos em 2024 no estado do Rio Grande do Sul, uma catástrofe de proporções devastadoras, considerada uma das maiores tragédias naturais relacionadas ao clima no Brasil. Para isso, foram utilizados dados de radar de abertura sintética (SAR), provenientes do satélite Sentinel-1, captados durante e antes do período das inundações. Adicionalmente, analisou-se dados de precipitação, visando compreender o regime pluviométrico dos meses correspondentes às imagens de radar, bem como identificar tendências mensais ao longo do tempo. Realizou-se a coleta e processamento dos dados de radar, incluindo recortes e correções necessárias, seguidos pela sobreposição de imagens para fazer a extração das áreas inundadas, com base na comparação dos dados de diferentes períodos. Todas as etapas foram conduzidas no *software* SNAP 10.0. Para a análise de tendências de precipitação, foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall. Como resultado, foram elaborados mapas representando as áreas inundadas na região de estudo, permitindo a identificação das zonas mais impactadas e a extensão das inundações ao longo do rio Jacuí. Os dados de radar mostraram-se especialmente eficazes no mapeamento das inundações, pois cobriram áreas extensas e permitiram a coleta de informações mesmo durante chuvas e sob cobertura de nuvens, fatores que limitam o sensoriamento óptico. As tendências observadas apontam para um aumento significativo de precipitação no município de Porto Alegre (de até 1,22 mm/ano), sugerindo que os eventos de inundação registrados em 2024 não foram apenas pontuais, mas fazem parte de um processo contínuo de intensificação das chuvas na região. Essas análises possibilitaram uma compreensão mais aprofundada das inundações

no estado e demonstraram a urgência de implementação de medidas preventivas.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento remoto; Áreas inundadas; Desastres hidrometeorológicos; Análise de tendências; Teste de Mann-Kendall.

FLOOD EVENTS IN 2024 IN RIO GRANDE DO SUL: AN APPROACH USING RADAR DATA AND PRECIPITATION ANALYSIS

ABSTRACT

This study aimed to map the areas affected by flood events that occurred in 2024 in the state of Rio Grande do Sul, a catastrophe of devastating proportions, considered one of the largest climate-related natural disasters in Brazil. For this purpose, Synthetic Aperture Radar (SAR) data from the Sentinel-1 satellite were used, captured during and before the flood period. Additionally, precipitation data were analyzed to understand the rainfall patterns during the months corresponding to the radar images and to identify monthly trends over time. Radar data collection and processing were carried out, including clipping and necessary corrections, followed by image overlay to extract the flooded areas based on comparisons between data from different periods. All procedures were conducted using SNAP 10.0 software. For precipitation trend analysis, the Mann-Kendall statistical test was applied. As a result, maps were generated representing the flooded areas in the study region, enabling the identification of the most affected zones and the extent of the flooding along the Jacuí River. Radar data proved particularly effective in flood mapping, as they covered large areas and allowed data collection even during rainfall and under cloud cover, which are limiting factors for optical sensing. The observed trends indicate a significant increase in precipitation in the municipality of Porto Alegre (up to 1.22 mm/year), suggesting that the flood events recorded in 2024 were not isolated, but rather part of an ongoing process of intensifying rainfall in the region. These analyses provided a deeper understanding of the floods in the state and highlighted the urgency of implementing preventive measures.

KEYWORDS: Remote sensing; Flooded areas; Hydrometeorological disasters; Trend Analysis; Mann-Kendall Test.

INTRODUÇÃO

As catástrofes ambientais são problemas reconhecidos em todo o mundo, não apenas por seus impactos sociais, mas também por seus impactos econômicos, dados os efeitos significativos que tsunamis, furacões, terremotos e inundações podem provocar nas economias ao redor do mundo (Lima; Barbosa, 2019). De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2023) os impactos associados às mudanças climáticas e de eventos extremos afetam ainda mais fortemente países e partes da população mais vulneráveis, agravando desigualdades pré-existentes.

Ao longo do processo de desenvolvimento social e econômico do Brasil, observaram-se diferentes padrões de uso e ocupação do solo, bem como uma distribuição populacional desigual. A essa dinâmica somam-se fatores como a vasta extensão territorial do país, a variabilidade climática, os distintos níveis de desenvolvimento econômico e de infraestrutura, além da vulnerabilidade natural

do relevo, sendo um conjunto de elementos que contribuem para os distintos graus de exposição e suscetibilidade da população brasileira à recorrência de desastres, como deslizamentos e inundações (Hummell, Cutter; Emrich, 2016; Dias *et al.*, 2018).

A desigualdade regional associada aos impactos das mudanças climáticas no Brasil é discutida por Perez *et al.* (2020), com ênfase nos eventos extremos de precipitação. Segundo os autores, as inundações e enchentes tendem a ter efeitos mais graves em função da infraestrutura precária presente em diversas regiões do Brasil, especialmente no Nordeste. No entanto, os autores ressaltam que mesmo em áreas com maior desenvolvimento econômico, como em regiões do Sudeste e Sul do Brasil, a elevada densidade populacional e a presença de numerosos assentamentos precários também contribuem para a intensificação das consequências desses desastres.

A região Sul do Brasil é uma das mais frequentemente afetadas por eventos de precipitação intensa e inundações repentinas (Nedel; Sausen, 2012). No estado do Rio Grande do Sul, segundo o Atlas Digital de Desastres no Brasil (Brasil, 2023), foram registrados mais de três mil desastres hidrológicos entre 1991 e 2013. As consequências incluem 121 óbitos, mais de 650 mil pessoas desabrigadas, 11,1 mil feridos e enfermos, além de um total de 8,71 milhões de pessoas afetadas.

Nos primeiros meses do ano de 2024, especialmente em maio, o estado do Rio Grande do Sul foi atingido por chuvas extremas que resultaram em uma das maiores tragédias naturais já registradas na região, sendo um dos maiores desastres climáticos do Brasil (Rizzotto; Costa; Lobato, 2024). Desde o final de abril de 2024, as fortes precipitações, associadas à lenta drenagem das águas, elevaram os níveis dos rios a patamares críticos, causando significativos danos humanos e prejuízos à infraestrutura local (Brasil, 2024). Segundo reportagem do G1 (2025), a catástrofe atingiu 96% dos municípios do estado do Rio Grande do Sul, afetou 2,4 milhões de pessoas e resultou em 184 mortos e 25 desaparecidos.

De acordo com Li *et al.* (2023), tecnologias de sensoriamento remoto são alguns dos principais métodos para análise e monitoramento de inundações. Os autores destacam como vantagens a possibilidade de acesso rápido às informações de risco de inundação de áreas específicas, eficiente no estudo de inundações em grande escala, e a possibilidade de se analisar a extensão da área alagada, duração da inundação e elementos expostos na área afetada, viabilizando análises espaciais por meio de ferramentas de geoprocessamento.

Além disso, vale ressaltar que a utilização de imagens de satélite possibilita o mapeamento de áreas inundáveis de forma remota, facilitando o planejamento de esforços de socorro, detecção de

possíveis deficiências nos mecanismos de controle de inundações e auxiliando no melhoramento de estratégias de mitigação (Munasinghe *et al.*, 2018).

Entretanto, o sensoriamento remoto óptico, que é amplamente utilizado no mapeamento de ocorrências diversas, pode não ser adequado para eventos ligados a alterações atmosféricas, como o da precipitação, que reduzem ou impossibilitam o uso desta tecnologia específica em decorrência da presença de nuvens que funcionam como obstáculos à visibilidade (Prudente *et al.*, 2020). Por conta disso, os dados de radar se sobressaem em relação ao sensoriamento óptico nos casos citados, por conta da capacidade de obter informações mesmo sob intensa cobertura de nuvens, possibilitando, por exemplo, o monitoramento de inundações durante os períodos chuvosos (Silva; Miranda; Landau, 2017; Sherpa; Shirzaei, 2022). Sherpa e Shirzaei (2022) destacam que a utilização de dados provenientes de Radar de Abertura Sintética (SAR) é de grande importância para análise de exposição e gerenciamento de inundações, pois permite o mapeamento da extensão do desastre em quase tempo real e com maior resolução.

Algumas pesquisas têm utilizado dados de radar para estudos sobre inundações (Gašparović; Klobučar, 2021; Benzougagh *et al.*, 2022; Thomas *et al.*, 2023; Shahi *et al.*, 2024), explorando o potencial desse tipo de informação para analisar diferentes casos de inundação no mundo. Com isso, vê-se a possibilidade do uso dos dados de radar para análise e mapeamento de inundações dos casos que têm ocorrido no Brasil, ou, mais especificamente, no estado do Rio Grande do Sul, que ainda carece de maior atenção de pesquisas científicas para auxiliar na prevenção desse tipo de desastre.

Portanto, a presente pesquisa teve como objetivo mapear as inundações ocorridas no mês de maio de 2024 em uma região localizada a oeste do município de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, abrangendo grande parte do percurso do rio Jacuí e parte do Lago Guaíba. Para isso, foram utilizados dados de Radar de Abertura Sintética (SAR) do satélite Sentinel-1, referentes a dois períodos distintos, um anterior e outro durante o evento de inundação, com o intuito de comparar as imagens e avaliar a extensão da área alagada. Adicionalmente, visou-se analisar a precipitação da área de estudo, avaliando o regime pluviométrico dos meses em que os dados de radar foram obtidos e realizando uma análise de tendências de dados de precipitação mensal na região.

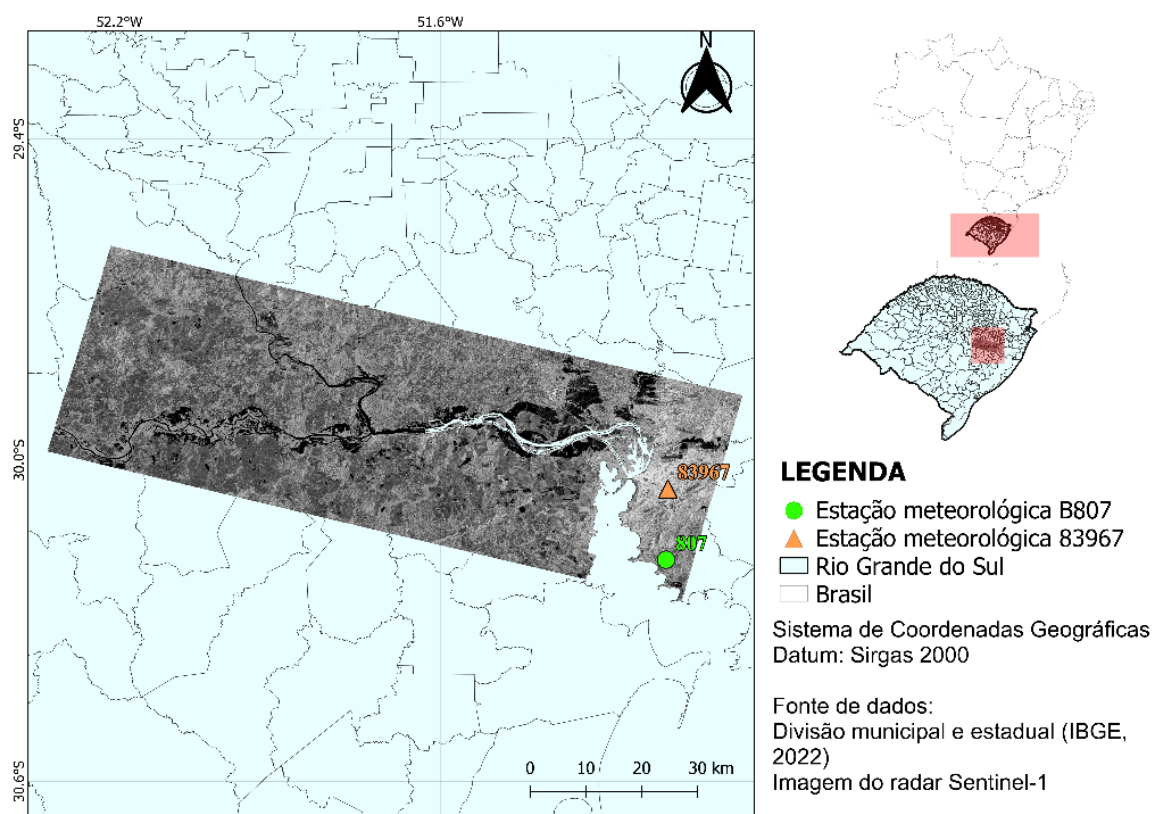
MATERIAIS E MÉTODOS

DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo desta pesquisa está localizada a oeste do município de Porto Alegre, contemplando parte do percurso do rio Jacuí e também parte do Lago Guaíba. Essa região pode ser

observada na imagem de satélite projetada sobre o mapa do Rio Grande do Sul na Figura 1. Essa área corresponde a uma parcela da região na qual ocorreram as inundações em 2024 no estado do Rio Grande do Sul. As estações meteorológicas utilizadas nas análises de dados de precipitação deste estudo também foram representadas na imagem.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Org.: Os autores

OBTENÇÃO DE DADOS

Os dados *Ground Range Detected* (GRD) do Sentinel-1 foram obtidos por meio da plataforma digital do *Alaska Satellite Facility* (ASF). Estabelecendo um ponto de referência nas proximidades do município de Porto Alegre, obteve-se os dados descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Informações sobre os dados obtidos do satélite Sentinel-1

Descrição do produto	Data da imagem	Polarização	Direção do voo	Órbita
Sentinel-1 IW Level-1 GRD	25/11/2023	VV+VH *	Descendente	51371
Sentinel-1 IW Level-1 GRD	11/05/2024	VV+VH *	Descendente	53821

*VV: Vertical-Vertical, VH: Vertical-Horizontal

Org.: Os Autores

Como observado na Tabela 1, a primeira imagem corresponde a um período anterior ao das inundações (dia 25 de novembro de 2023), enquanto que a segunda imagem se deu durante o período das inundações da área de estudo (dia 11 de maio de 2024).

Registros de precipitação média diária do município de Porto Alegre foram coletados para os meses correspondentes aos dados de radar obtidos: novembro de 2023 e maio de 2024. Escolheu-se uma estação meteorológica automática do município de Porto Alegre pois apenas esta apresentava, na área de estudo, dados de precipitação média diária para todos os dias nos dois meses abordados. Esses dados foram obtidos a partir do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que os disponibilizam na forma de séries históricas, oriundos de medições realizadas em estações meteorológicas operadas pelo INMET. Na Tabela 2, descreve-se a estação meteorológica utilizada nesta etapa.

128

Tabela 2 - Descrição da estação meteorológica utilizada para obter dados diários de precipitação para os meses de novembro de 2023 e maio de 2024

Nome	Operador	Estação	Latitude S (°)	Longitude W (°)	Altitude (m)
Porto Alegre - Belém Novo	INMET	B807	-30,19	-51,18	3,3

Org.: Os Autores

Por meio da análise dos dados de precipitação, foi possível compreender a diferença entre os regimes de precipitação que ocorreram entre os meses de novembro de 2023 e de maio de 2024, visto que a intensificação da chuva foi muito associada às inundações registradas na área de estudo.

Além disso, dados de precipitação média mensal foram coletados para realizar a análise de tendências de precipitação para o município de Porto Alegre. Nesse caso, utilizou-se uma estação

meteorológica do INMET do tipo convencional, pois possibilitou obter uma série histórica que abrange um maior número de anos, algo de interesse para o estudo de tendências nos dados. Na Tabela 3, descreve-se a estação meteorológica que coletou os dados utilizados nesta etapa, o intervalo da série histórica utilizada e o período total de anos estudados.

Tabela 3 - Descrição da estação meteorológica utilizada para obter dados mensais de precipitação

Município da estação	Operador	Estação	Latitude S (°)	Longitude W (°)	Altitude (m)	Intervalo da série (ano)	Período (anos)
Porto Alegre	INMET	83967	-30,05	-51,17	41,18	1961-2023	63

Org.: Os Autores

PROCESSAMENTO DOS DADOS DE RADAR

Os dados obtidos pelo satélite Sentinel-1 requerem uma série de etapas de pré-processamento para que possam ser adequadamente utilizados nos objetivos deste estudo. Entre os procedimentos realizados, destacam-se: o recorte da área de interesse, a remoção de ruído térmico, a calibração radiométrica, a aplicação de filtro *speckle*, a incorporação do arquivo de órbita, a correção topográfica (ou correção de terreno) e a conversão dos dados do formato linear para escala logarítmica, expressa em decibéis (dB). Para a execução dessas etapas, foi utilizado o *software Sentinel Application Platform* (SNAP), versão 10.0, disponibilizado pela Agência Espacial Europeia (European Space Agency - ESA).

O preparo das imagens foi uma etapa fundamental para a análise comparativa proposta neste estudo. A remoção de ruído térmico é essencial, especialmente em áreas com baixo retroespalhamento, pois esse tipo de interferência compromete a qualidade das imagens. A calibração radiométrica, por sua vez, visa garantir a comparabilidade quantitativa entre imagens SAR obtidas por diferentes sensores ou em diferentes períodos de tempo por um mesmo sensor (Abazaj; Hasko, 2020).

O filtro de *speckle* utilizado atua na redução do ruído *speckle* sem comprometer os detalhes espaciais da imagem, suavizando contornos das diferentes formas exibidas e evitando a perda de informações importantes. Já o uso do arquivo orbital fornece dados precisos sobre a posição e velocidade do satélite, garantindo maior precisão na análise. A correção do terreno, por sua vez, elimina distorções causadas por variações na topografia e no ângulo de incidência do sinal em relação ao solo diretamente abaixo do satélite (Abazaj; Hasko, 2020). A conversão dos dados do formato

linear para a escala logarítmica, em decibéis (dB), foi adotada neste estudo com o intuito de tornar os resultados mais visíveis e facilitar sua interpretação.

ANÁLISE DA INUNDAÇÃO

Após o processamento dos dados de radar, foi realizado o comparativo entre eles no *software* SNAP 10.0, utilizando a ferramenta *Band Maths* (Matemática de Bandas), com o objetivo de identificar as áreas inundadas. Foram criados vetores para regiões representativas de corpos hídricos e áreas potencialmente alagadas nas imagens processadas. A partir da análise dos histogramas dos vetores, foi definido o valor de -16 como limiar para se fazer a geração de duas imagens binárias, contemplando tanto áreas inundadas quanto corpos d'água presentes nas imagens.

Utilizando a função *Create Stack* do *software* SNAP, foi realizada a sobreposição das duas imagens geradas, permitindo a comparação das variações na cobertura hídrica entre os períodos. Em seguida, aplicou-se novamente a ferramenta *Band Maths* nas imagens sobrepostas, fazendo-se a subtração entre as duas imagens binárias criadas para áreas inundadas e corpos hídricos. Essa operação teve como objetivo eliminar os elementos comuns a ambas as imagens, tais como corpos hídricos e demais elementos permanentes, preservando apenas as áreas que passaram a apresentar inundação na imagem do ano de 2024. Desse modo, obteve-se a representação espacial das zonas efetivamente inundadas dentro do recorte da área de estudo e, com isso, o valor em km² da área da inundação no recorte de estudo.

Os produtos finais gerados foram exportados no formato GeoTIFF e implementados no *software* QGIS 3.28 para a elaboração de mapas e representações visuais das áreas afetadas.

A análise qualitativa realizada neste estudo concentrou-se na identificação das características espaciais das áreas inundadas a partir de dados de radar do Sentinel-1. Essa abordagem permitiu detectar regiões específicas impactadas pelas inundações, bem como alterações na configuração dos corpos hídricos. Ao destacar elementos visuais nas imagens, como padrões de reflexão do radar, foi possível inferir mudanças nas condições superficiais, especialmente a presença de água. A análise ainda incorporou uma perspectiva temporal, comparando imagens de radar obtidas em diferentes períodos para observar e documentar a evolução das inundações.

Vale ressaltar que, de acordo com Brivio *et al.* (2002), as imagens de radar apresentam algumas limitações na detecção de áreas inundadas devido a fatores como a rugosidade da superfície e as propriedades dielétricas do solo. Superfícies lisas, como corpos d'água, tendem a refletir a radiação longe do sensor, resultando em áreas escuras nas imagens, o que facilita a identificação de

inundações. No entanto, os autores ressaltam que essa capacidade pode ser comprometida por condições climáticas adversas e pela presença de vegetação, que tornam a superfície mais irregular, além de sombras, estradas pavimentadas e a própria rede hidrológica, que podem ser erroneamente identificadas como áreas inundadas, devido à tonalidade escura nas imagens de radar. Os processamentos aplicados aos dados, juntamente com o fato de a imagem do período inundado ter sido capturada durante a inundação, contribuem para mitigar alguns dos impactos dessas limitações.

ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO

Para identificar potenciais tendências nos dados mensais de precipitação obtidos para o município de Porto Alegre foi utilizado o teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1970), que se trata de um método não paramétrico recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM). Para determinar a estatística S do teste de Mann-Kendall, realiza-se a comparação entre valores sequenciais x_i e x_j , de acordo com as Equações 1 e 2 (Sanogo *et al.*, 2023).

$$\text{sign}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se}(x_j - x_i) > 0 \\ 0, & \text{se}(x_j - x_i) = 0 \\ -1, & \text{se}(x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad \text{Equação 1}$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad \text{Equação 2}$$

Sendo N o tamanho da série e x_j e x_i os valores anuais nos j-ésimo e i-ésimo anos, respectivamente.

Pode-se obter a variância da estatística S utilizando a Equação 3. Com isso, calcula-se a estatística de teste Z, o resultado do teste de Mann-Kendall, conforme estabelecido na Equação 4 (Walega *et al.*, 2016).

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \cdot \left[(n \cdot (n-1) \cdot (2n+5)) - \sum_{p=1}^g t_p \cdot (t_p-1) \cdot (2t_p+5) \right] \quad \text{Equação 3}$$

$$Z = \frac{S - \text{sign}(S)}{\text{Var}(S)^{1/2}} \quad \text{Equação 4}$$

No cálculo da variância, o termo g representa o número de grupos com valores iguais na série temporal, enquanto t_p refere-se ao número de observações no p-ésimo grupo. Para a estatística de

teste Z, o valor de $\text{sign}(S)$ assume 0, +1 ou -1, dependendo se S for igual a zero, positivo ou negativo, respectivamente.

Caso a estatística Z seja positiva, interpreta-se que há uma tendência crescente nos dados, enquanto o resultado negativo indica tendência decrescente. A interpretação do valor da estatística Z foi complementada por uma análise de significância, a fim de avaliar a validade da hipótese nula, a qual pressupõe a inexistência de tendências estatisticamente relevantes. Quando a probabilidade do teste (p) é inferior ao nível de significância adotado (α), conclui-se pela existência de uma tendência significativa, o que implica a rejeição da hipótese nula (Walega *et al.*, 2016). Para isso, foram adotados quatro níveis de significância: $+p < 0,1$; $* p < 0,05$; $** p < 0,01$ e $*** p < 0,001$.

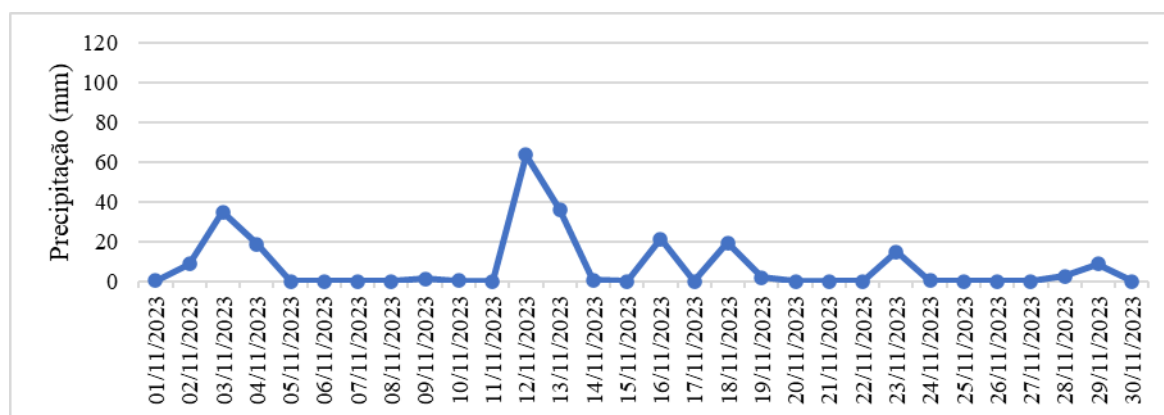
As análises foram conduzidas com o auxílio do *software Makesens* (versão 1.0), o qual permite identificar tendências em séries temporais utilizando o teste de Mann-Kendall, além de estimar a magnitude dessas tendências por meio do estimador de inclinação de Sen (Salmi *et al.*, 2002). As investigações foram realizadas em diferentes escalas temporais: mensal, trimestral, semestral e anual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

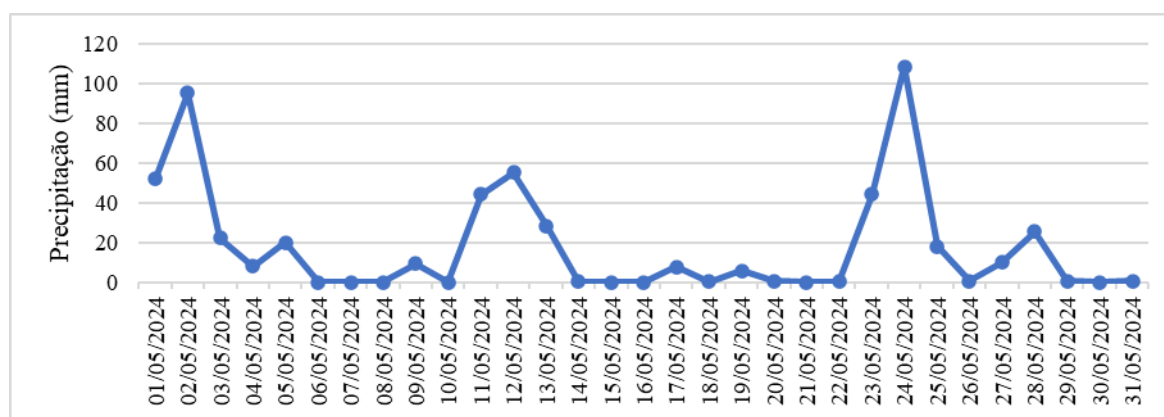
RESULTADOS DA ANÁLISE DA PRECIPITAÇÃO MENSAL

Os valores médios dos dados de precipitação diária obtidos do município Porto Alegre para o mês de novembro de 2023 foram representados na Figura 2 (a), enquanto os do mês de maio de 2024 na Figura 2 (b).

Figura 2 - Precipitação registrada na estação meteorológica de Porto Alegre - Belém Novo - durante o mês de novembro de 2023 (a) e durante o mês de maio de 2024 (b)



(a)



(b)

Org.: Os autores

A quantidade de precipitação registrada em maio de 2024 (total de 556,2 mm) foi consideravelmente superior à observada em novembro de 2023 (total de 233,2 mm). No mês de novembro, a precipitação não ultrapassou os 63,6 mm, valor registrado no dia 12. Em contraste, em maio de 2024, foi registrado um pico de precipitação média diária de 108,6 mm no dia 24. Elevadas precipitações em 2024, como as registradas no mês de maio, estão entre os principais fatores que contribuíram para as inundações no estado do Rio Grande do Sul.

Entre os dados de radar utilizados nesta pesquisa, um conjunto foi coletado em 25 de novembro de 2023, data na qual não foram registradas chuvas na área da estação meteorológica de Porto Alegre considerada no estudo (Figura 2a). Os demais dados de radar analisados referem-se ao dia 11 de maio de 2024, quando a precipitação média diária registrada foi de 44,2 mm (Figura 2b). Sendo assim, ao utilizar dados de satélite das datas indicadas anteriormente, foi possível estabelecer

uma comparação entre um período de precipitação intensa, durante os eventos de inundação, e um período com precipitação regular.

Porém, vale ressaltar que o município de Porto Alegre está localizado na bacia do Guaíba, de modo que a precipitação em toda a região da bacia, especialmente nas áreas a montante, influencia diretamente a ocorrência de inundações. De acordo com Marengo *et al.* (2024), durante um primeiro período chuvoso, entre os dias 29 de abril e 2 de maio de 2024, foram registrados volumes acumulados de precipitação entre 600 e 700 mm nas regiões dos rios Taquari, Caí e Pardo, que fazem parte a bacia do Guaíba. Esses elevados volumes de chuva contribuíram para a elevação do nível do rio Guaíba, deflagrando a inundação a partir de 2 de maio, a qual atingiu seu pico em 5 de maio, com o nível do rio alcançando 5,35 metros. Em um segundo período chuvoso apresentado pelos autores, relata-se, entre 10 e 13 de maio, precipitação acumulada de valor entre 200 e 300 mm na mesma região e também sobre Porto Alegre, o que teve como consequência uma nova elevação do nível do Guaíba acima da cota de inundação, embora com valores inferiores aos registrados no dia 5 de maio. Desse modo, vê-se a influência da precipitação ocorrida na bacia do Guaíba na ocorrência das inundações na área de estudo.

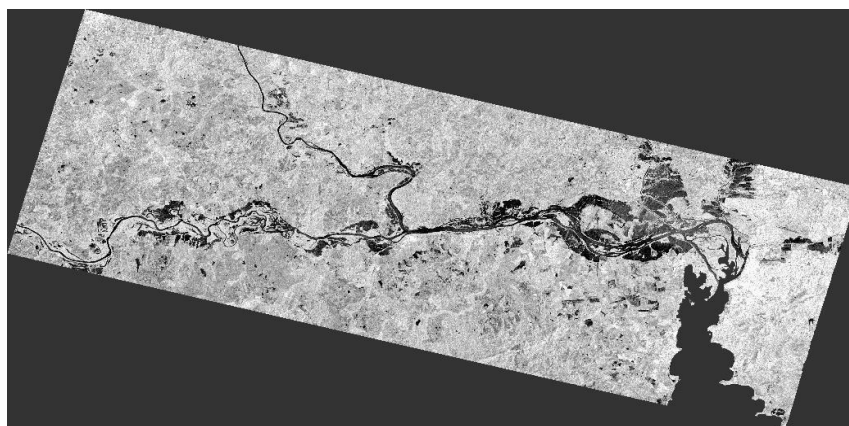
RESULTADOS DA ANÁLISE DAS INUNDAÇÕES POR MEIO DE DADOS DE RADAR

134

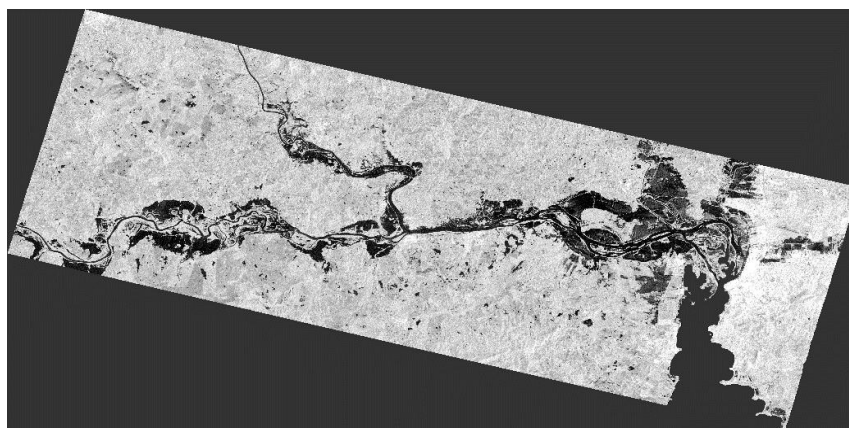
Realizaram-se os procedimentos metodológicos de processamento de dados no *software* SNAP 10.0 para os dados *Ground Range Detected* (GRD) do satélite Sentinel-1, obtendo-se a Figura 3(a), representativa da área de estudo no dia 25 de novembro de 2023 (antes das inundações), e a Figura 3 (b), correspondente a área de estudo no dia 11 de maio de 2024 (durante as inundações).

Pode-se observar diferenças na superfície hídrica entre as imagens da Figura 3(a) e Figura 3(b). As regiões mais escuras dentro dos recortes nessas imagens representam a presença de água. Portanto, as áreas escuras adicionais presentes na Figura 3 (b) indicam, potencialmente, as regiões inundadas.

Figura 3 - Imagem processada dos dados do Sentinel-1 do dia 25 de novembro de 2023 (a) e do dia 11 de maio de 2024 (b)



(a)



(b)

Org.: Os autores

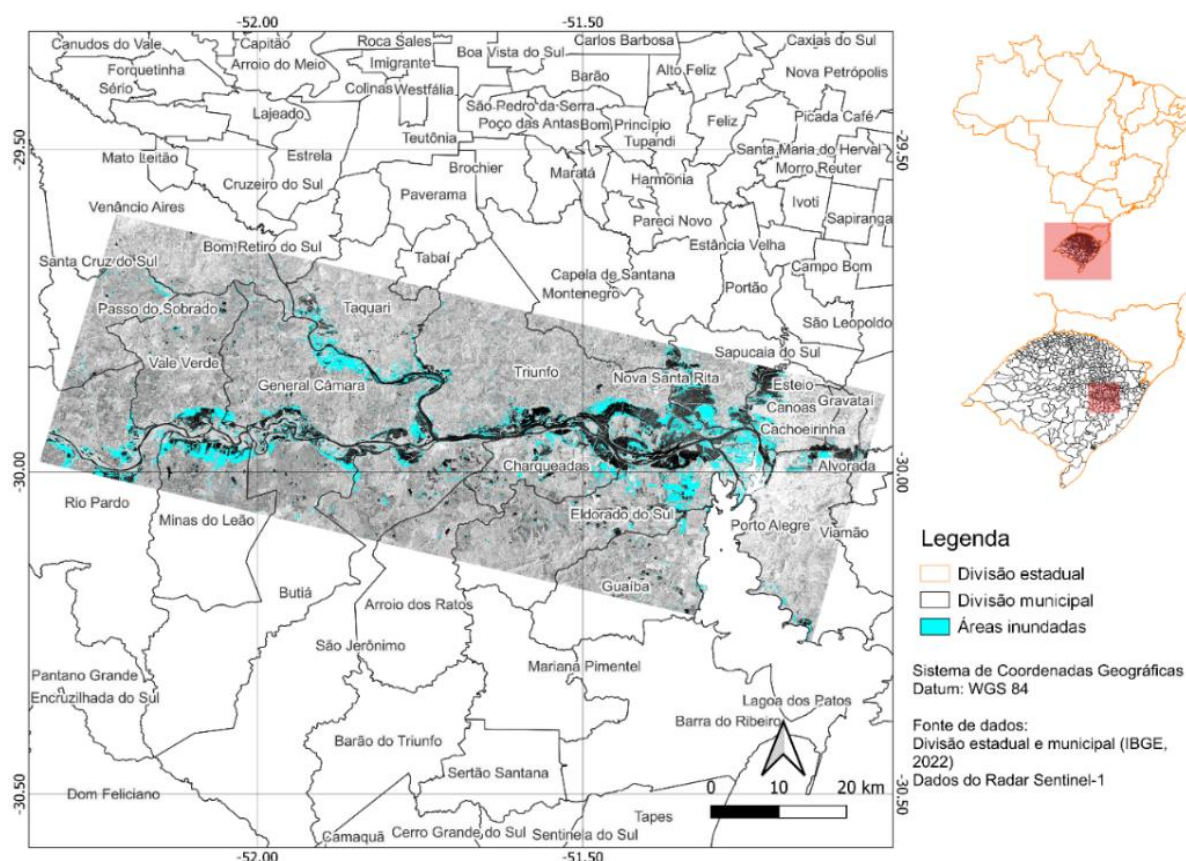
Com a sobreposição de imagens e os procedimentos de *Band Maths*, obteve-se a Figura 4, que destaca as áreas inundadas. Nessa figura, viu-se a extensão das áreas inundadas ao longo da região de estudo, possibilitando, assim, a previsão de áreas de risco para inundações futuras, as quais exigem, com mais urgência, medidas preventivas e de mitigação a inundações.

Observou-se que áreas inundadas ocorrem ao longo de todo o percurso do Rio Jacuí, especialmente nas margens do rio e em regiões de confluência. A imagem revela uma sobrecarga no sistema hídrico da região, o que pode ser associado a grandes volumes de precipitação. Com isso, houve uma incapacidade de escoar toda a água por meio do curso natural dos rios locais, resultando em alagamentos e inundações.

Aplicou-se a função de *computar área* para a camada de máscara que continha todos os pixels representativos da inundação na região, obtendo-se, assim, que a área de inundação na região estudada foi de 268,545 km², equivalente a aproximadamente 1,12 mil vezes a área do Estádio Jornalista Mario

Filho (Maracanã), o maior estádio de futebol no Brasil. Cabe ressaltar que a área inundada calculada deve subestimar o real impacto do evento na região, visto que os dados de satélite se referem às condições do dia 11 de maio de 2024 e que posterior a essa data, entre os dias 12/05/2024 e 31/05/2024, registrou-se precipitação acumulada de 305,6 mm.

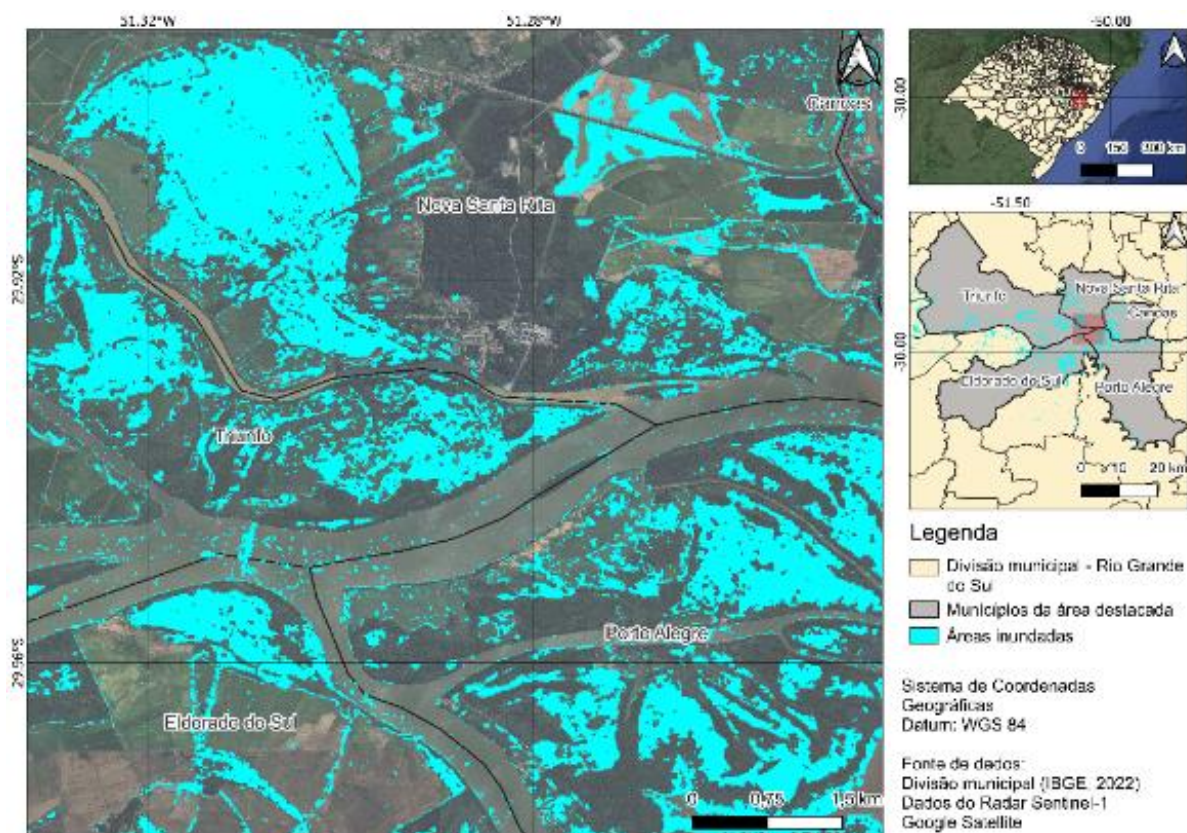
Figura 4 - Identificação das áreas inundadas na região estudada



Org.: Os autores

Destaca-se na Figura 5 grandes áreas inundadas presentes nos municípios de Canoas, Porto Alegre, Eldorado do Sul, Triunfo e Nova Santa Rita. Em regiões em que acontecem o encontro de diversos corpos hídricos, a inundação se estendeu de forma ainda mais expressiva.

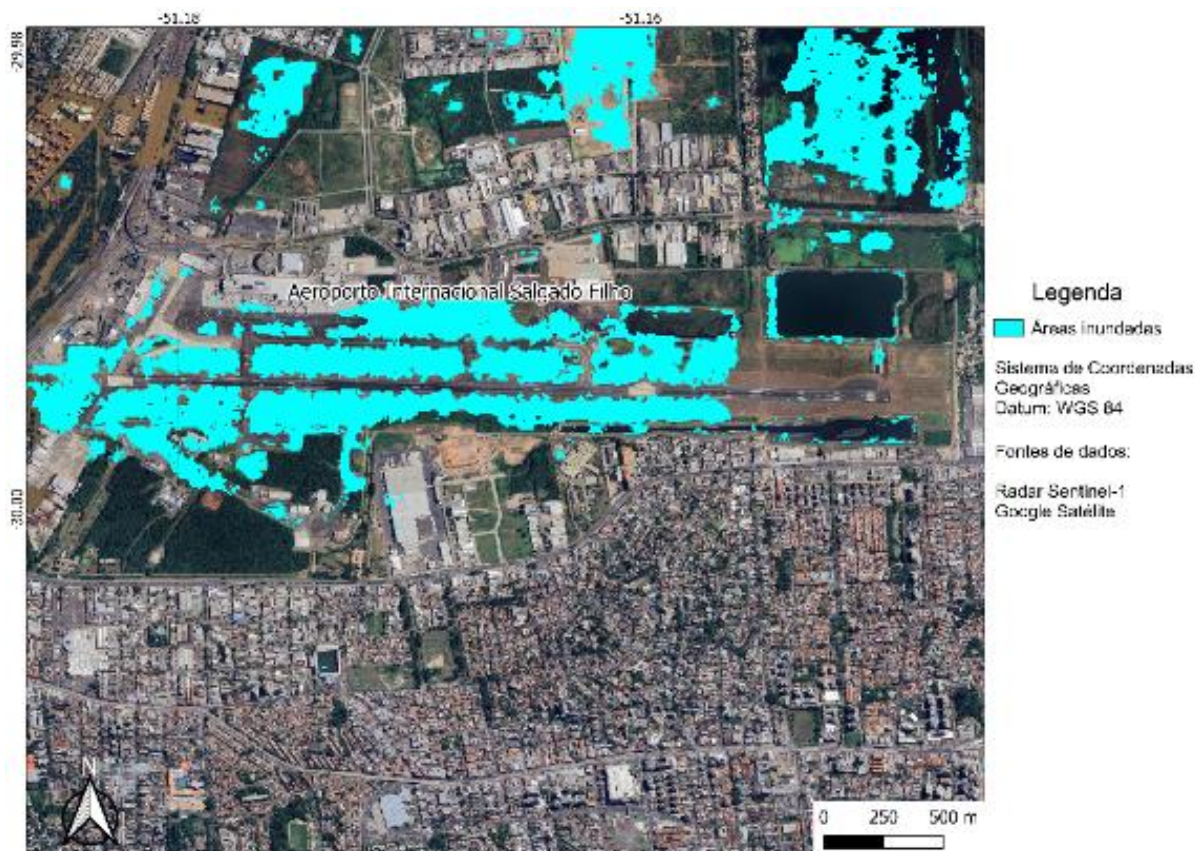
Figura 5 - Destaque para áreas de inundação na fronteira entre os municípios de Canoas, Porto Alegre, Eldorado do Sul, Triunfo e Nova Santa Rita



Org.: Os autores

Na Figura 6, destaca-se uma região que abrange o Aeroporto Internacional Salgado Filho, localizado no município de Porto Alegre - RS. A partir dos dados obtidos por radar, foi possível observar que essa área, de grande relevância para o sistema de transportes do estado, foi gravemente impactada pelas inundações.

Figura 6 - Áreas inundadas próximas ao Aeroporto Internacional Salgado Filho



Org.: Os autores

Dessa forma, verifica-se que os prejuízos causados pelas inundações no Rio Grande do Sul se estendem por diversos setores da sociedade, afetando desde a infraestrutura urbana, como o sistema de transporte e edificações, até a população diretamente, resultando em possíveis óbitos e no aumento do número de pessoas desabrigadas.

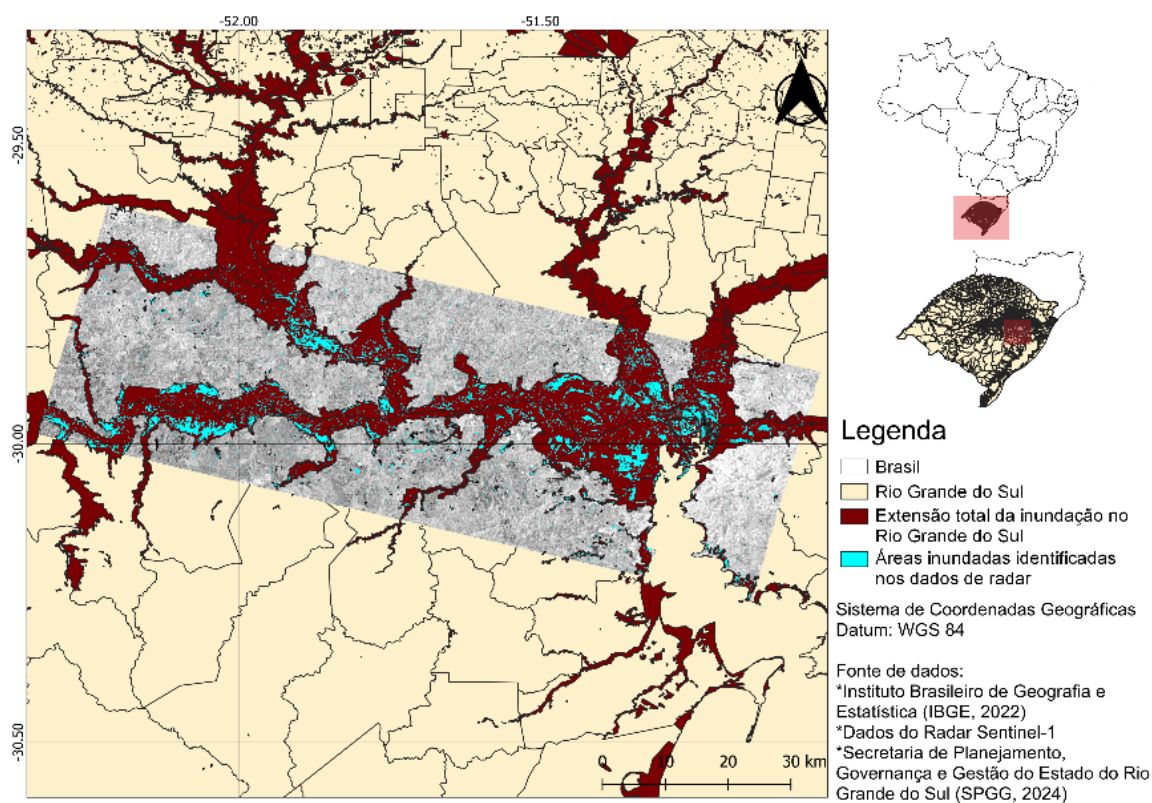
Por outro lado, na avaliação da extensão territorial das inundações, destaca-se que, apesar de a metodologia adotada possibilitar a análise mesmo sob cobertura de nuvens, os resultados obtidos ainda subestimam a real magnitude do evento. A Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul (SPGG, 2024) disponibiliza dados que representam a área diretamente impactada pelos eventos extremos registrados no Estado em 2024. Esses dados foram comparados, na Figura 7, com as áreas inundadas identificadas por meio de dados de radar utilizados nesta pesquisa.

Observa-se que a extensão da região afetada, conforme apresentada pela SPGG, é superior à área detectada nos dados de radar para a região de estudo. Esse resultado evidencia que a metodologia

empregada pode subestimar a área total impactada pelas inundações. Tal limitação pode estar relacionada tanto às características inerentes aos dados de radar quanto às premissas adotadas na metodologia de comparação entre as duas imagens utilizadas, bem como aos períodos distintos de aquisição dos dados.

Cabe destacar que, na delimitação das áreas inundadas a partir dos dados de radar, foram desconsiderados os corpos hídricos permanentes da região, por já integrarem a paisagem natural da área de estudo, o que pode contribuir para uma subestimação da extensão total da área afetada quando comparada aos dados disponibilizados pela SPGG. Além disso, a metodologia aplicada nesta pesquisa aos dados de radar possibilitou a identificação de inundações em pontos específicos que não foram contemplados nos dados da SPGG, demonstrando sua utilidade complementar na detecção de áreas afetadas.

Figura 7 Comparação entre a extensão das áreas inundadas identificadas nos dados de radar com a extensão total das inundações dos dados disponibilizados pela Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Rio Grande do Sul



Org.: Os autores

RESULTADOS DA ANÁLISE DE TENDÊNCIAS DE PRECIPITAÇÃO

Os resultados do teste de Mann-Kendall, realizado em conjunto ao estimador da inclinação de Sen, para os dados de precipitação mensal de Porto Alegre nas escalas de tempo mensal (de janeiro a dezembro), trimestral (DJF, MAM, JJA, SON), semestral (janeiro a junho e julho a dezembro) e anual são apresentados na Tabela 4.

Tendências significativas de aumento de precipitação foram observadas para o município de Porto Alegre. Essas tendências ocorreram apenas na escala mensal, nos meses de janeiro, abril, maio e julho. Nos demais meses e escalas temporais, as tendências observadas não foram estatisticamente significativas. Vale destacar que o mês de maio, correspondente ao período analisado para o ano de 2024 nos dados de radar, apresentou uma tendência de maior significância do que os demais meses, com uma magnitude de 1,021 mm/ano, sendo superada apenas pela do mês de julho.

Tabela 4: Tendências observadas nos dados de precipitação média mensal da estação meteorológica do município de Porto Alegre

Período	Magnitude da tendência (mm/ano)
Janeiro	0,656 +
Fevereiro	0,053 ns
Março	-0,050 ns
Abril	0,783 +
Maio	1,021 *
Junho	0,633 ns
Julho	1,219 +
Agosto	-0,358 ns
Setembro	0,717 ns
Outubro	0,829 ns
Novembro	0,576 ns
Dezembro	0,071 ns
DJF	0,656 ns
MAM	0,053 ns
JJA	-0,050 ns
SON	0,783 ns
Jan-Jun	1,021 ns
Jul-Dez	0,633 ns
Anual	1,219 ns

ns: não significativo; + $\rho < 0,10$; * $\rho < 0,05$

Considerando que a precipitação em Porto Alegre tem aumentado progressivamente, especialmente nos primeiros meses do ano, os riscos de ocorrência de eventos extremos, como

inundações, tornam-se mais elevados. A análise de tendências realizada nesta pesquisa permitiu compreender que as intensas inundações observadas em 2024 não foram resultado de um evento isolado, mas sim reflexo de um processo contínuo de intensificação das chuvas na região. Esse cenário já indicava a necessidade de adaptação da infraestrutura do estado do Rio Grande do Sul para lidar com volumes pluviométricos mais elevados.

Conforme mencionado anteriormente, além do município de Porto Alegre, a precipitação em toda a bacia do Guaíba influencia a ocorrência de inundações na área de estudo. Vieira *et al.* (2021) identificaram mudanças no comportamento temporal da vazão dos rios em diversas estações da região da bacia do Guaíba, com tendências de aumento tanto em eventos de grande vazão quanto nas vazões mínimas, associadas a um crescimento no volume de precipitação. No entanto, essas chuvas tendem a se concentrar em curtos períodos, favorecendo a ocorrência de eventos extremos. Apesar desses resultados, os autores destacam a dificuldade de realizar um estudo hidroclimático abrangente na região devido à escassez de dados, visto que poucas estações possuem séries históricas com períodos superiores a 30 anos, com grande parte apresentando apenas dados de períodos recentes ou com muitas falhas.

Alguns estudos (Dimitriou, 2022; Eingrüber; Korres, 2022; Mou *et al.*, 2022) já associaram a variabilidade da precipitação e as mudanças climáticas ao aumento da frequência de desastres naturais, como as inundações. Lima e Lira (2021), por exemplo, identificaram que, no estado do Ceará, as estiagens e secas apresentam alta correlação negativa com os volumes de chuva, enquanto inundações, enxurradas, alagamentos e chuvas intensas se correlacionam de forma moderada e positiva, evidenciando a influência direta da variabilidade climática sobre eventos extremos.

Os resultados das análises de precipitação e inundações desta pesquisa são consistentes com os apresentados por Martini (2022). De acordo com o autor, a região Sul do Brasil apresenta uma tendência de aumento na precipitação anual, ao mesmo tempo em que a frequência e a intensidade de chuvas fortes indicam uma redução no intervalo de recorrência desses eventos extremos. Dessa forma, o risco de inundações tem crescido para essa região.

CONCLUSÃO

Para o mês de maio de 2024, foram observados elevados valores de precipitação diária, a partir dos dados coletados de uma estação meteorológica, superando valores observados em novembro de 2023. A partir da comparação dos dados de radar referentes a dias específicos desses dois períodos, foi possível identificar uma área total de inundação de 268,545 km² no recorte da região analisada,

tamanho equivalente a aproximadamente 1,12 mil vezes a área do Estádio Jornalista Mario Filho (Maracanã), o maior estádio de futebol no Brasil. Porém, vale ressaltar que os impactos causados pelas inundações foram ainda maiores do que os identificados nesta pesquisa, atingindo outras áreas e um maior período de tempo do que os que era coberto pelos dados de radar utilizados. Comparando-se com dados do total de áreas inundadas no estado disponibilizados pela Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul, viu-se que a metodologia empregada pode subestimar a área total impactada pelas inundações.

Observou-se que, ao longo do leito do Rio Jacuí, diversos municípios foram impactados pela elevação do nível da água, afetando tanto áreas urbanas quanto rurais. A inundação foi ainda mais expressiva nas regiões de confluência entre o Rio Jacuí e outros corpos hídricos, destacando-se casos nas zonas de limite entre os municípios de Canoas, Porto Alegre, Eldorado do Sul, Triunfo e Nova Santa Rita.

Foram identificadas tendências positivas nos dados de precipitação média mensal do município de Porto Alegre, indicando um comportamento crescente desse elemento climático ao longo do tempo. O mês de julho apresentou a maior tendência significativa de aumento, de 1,219 mm/ano. Vale destacar que o mês de maio, para o qual se fez a análise de inundação nesta pesquisa, foi um dos meses para o qual se observou uma tendência significativa de aumento de precipitação, com o valor de 1,021 mm/ano.

A partir de uma análise integrada, que combinou ferramentas de sensoriamento remoto com análise estatística de tendências de precipitação, foi possível obter uma descrição aprofundada das condições climáticas que contribuíram para a ocorrência das inundações. Além disso, foram identificadas as áreas afetadas, gerando informações que podem servir de base para a formulação de medidas preventivas e estratégias de mitigação para inundações no estado do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

ABAZAJ, F.; HASKO, G. Use of Sentinel-1 data in flood mapping in the Buna River area. **International Journal of Environment and Climate Change**, p. 147-156, 2020.
<https://doi.org/10.9734/ijecc/2020/v10i1030257>

BENZOUGAGH, B. *et al.* Flood mapping using multi-temporal sentinel-1 SAR images: a case study - Inaouene watershed from Northeast of Morocco. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, v. 46, p. 1481-1490, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s40996-021-00683-y>

BRASIL. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. Secretaria de Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil. Atlas Digital de Desastres no Brasil. Brasília: MIDR, 2023.

BRASIL. Sistema Federal de Proteção e Defesa Civil. Relatório de Operação - Rio Grande do Sul n. 13. Brasília, 2024.

BRIVIO, P. A. *et al.* Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 3, p. 429-441, 2002. <https://doi.org/10.1080/01431160010014729>

DIAS, M. C. A. *et al.* Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 31, p. 449-459, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.06.002>

DIMITRIOU, E. Precipitation Trends and Flood Hazard Assessment in a Greek World Heritage Site. **Climate**, v. 10, n. 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/cli10120194>

EINGRÜBER, N.; KORRES, W. Climate change simulation and trend analysis of extreme precipitation and floods in the mesoscale Rur catchment in western Germany until 2099 using Statistical Downscaling Model (SDSM) and the Soil & Water Assessment Tool (SWAT model). **Science of The Total Environment**, v. 838, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155775>

G1. Mais de 180 mortos, 25 desaparecidos e 96% das cidades atingidas: o raio-x da enchente que devastou o RS um ano após tragédia. 2025. Disponível em: <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/1-ano-de-enchente-rs/noticia/2025/04/29/mais-de-180-mortos-25-desaparecidos-e-96percent-das-cidades-atingidas-o-raio-x-da-enchente-que-devastou-o-rs-um-ano-apos-tragedia.ghtml>. Acesso em: 30 maio. 2025.

GAŠPAROVIĆ, M.; KLOBUČAR, D. Mapping floods in lowland forest using Sentinel-1 and Sentinel-2 data and an object-based approach. **Forests**, v. 12, n. 5, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12050553>

HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C. T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 7, p. 111-122, 2016. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0090-9>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malha Municipal**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas>. Acesso em: 25 maio. 2025.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. 4. ed. Londres: Charles Griffin, 1970.

LI, C. *et al.* Review on urban flood risk assessment. **Sustainability**, v. 15, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15010765>

LIMA, R. C. A.; BARBOSA, A. V. B. Natural disasters, economic growth and spatial spillovers: Evidence from a flash flood in Brazil. **Papers in Regional Science**, v. 98, n. 2, p. 905-925, 2019. <https://doi.org/10.1111/pirs.12380>

LIMA, M. A. S.; LIRA, M. A. T. A variabilidade climática e os desastres naturais no Estado do Ceará (1991-2019). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 603-614, 2021. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630035>

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. **Econometrica Journal of the Econometric Society**, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945. <https://doi.org/10.2307/1907187>

MARENGO, J. A. *et al.* O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. **Estudos Avançados**, v. 38, n. 112, p. 203-227, 2024. <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012>

MARTINI, L. C. P. Changes in rainfall patterns in southern Brazil over 1961-2020 period detected by rain gauge data. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 9101-9114, 2022. <https://doi.org/10.1002/joc.7804>

MOU, Y. *et al.* Variation characteristics and the impact of urbanization of extreme precipitation in Shanghai. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22352-4>

MUNASINGHE, D.; COHEN, S.; HUANG, Y.; TSANG, Y.; ZHANG, J.; FANG, Z. Intercomparison of satellite remote sensing-based flood inundation mapping techniques. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 54, n. 4, p. 834-846, 2018. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12626>

144

NEDEL, A. S.; SAUNSEN, T. Análise das Inundações Bruscas Ocorridas na Região Sul do Brasil no Período 1980-2009. **Ciência e Natura**, v. 34, n. 1, p. 119-129, 2012. <https://doi.org/10.5902/2179460X9358>

PEREZ, L. P. *et al.* Climate change and disasters: Analysis of the Brazilian regional inequality. **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, n. 3, p. 260–277, 2020. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v11n3.2020.33813>

PRUDENTE, V. H. R. *et al.* Limitations of cloud cover for optical remote sensing of agricultural areas across South America. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 20, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100414>

RIZZOTTO, M. L. F.; COSTA, A. M.; LOBATO, L.V. C. Crise climática e os novos desafios para os sistemas de saúde: o caso das enchentes no Rio Grande do Sul/Brasil. **Saúde em Debate**, v. 48, 2024. <https://doi.org/10.1590/2358-28982024141EDP>

SALMI, T. *et al.* Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates –the Excel template application MAKESENS. Finlândia: Finnish Meteorological Institute, Publications on Air Quality n. 31, 2002.

SANOGO, A. *et al.* Investigation into recent temperature and rainfall trends in Mali using Mann-Kendall trend test: case study of Bamako. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 11, n. 3, p. 155-172, 2023. <https://doi.org/10.4236/gep.2023.113011>

SHERPA, S. F.; SHIRZAEI, M. Country-wide flood exposure analysis using Sentinel-1 synthetic aperture radar data: Case study of 2019 Iran flood. **Journal of Flood Risk Management**, v. 15: e12770, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12770>

SHAHI, K. R. *et al.* DC4Flood: A deep clustering framework for rapid flood detection using Sentinel-1 SAR imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 21, 2024. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2024.3390745>

SILVA, I. H. C.; MIRANDA, F. P.; LANDAU, L. Avaliação da suscetibilidade de bacias hidrográficas ao desenvolvimento de inundações por integração de dados fisiográficos e sensoriamento remoto por radar. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 9, p. 1687-1709, 2017. <https://doi.org/10.14393/rbcv69n9-44085>

SPGG - Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão do Estado do Rio Grande do Sul. 2024. Área diretamente atingida pelo eventos extremos ocorridos no Estado em 2024. Disponível em: <https://metadados.iede.rs.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/63862411-8B51-4E08-A4BA-D624783C453A>. Acesso em: 14 jun. 2025.

THOMAS, M. *et al.* A Framework to Assess Remote Sensing Algorithms for Satellite-Based Flood Index Insurance. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 16, p. 2589-2604, 2023. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3244098>

145

VIEIRA, S. A. *et al.* Analysis of flows in the Guaíba Hydrographic Region: Current variability and Trends due to Climate Change. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 03, p. 1559-1570, 2021. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1559-1570>

WALEGA, A. *et al.* Analysis of the course and frequency of high water stages in selected catchments of the upper Vistula basin in the south of Poland. **Water (Switzerland)**, v. 8, n. 9, 2016. <https://doi.org/10.3390/w8090394>

WMO - World Meteorological Organization. **2023 state of climate services**: Health. Genebra, Suíça, 2023.

DOI: 10.5281/zenodo.16380062

Recebido em: 30/05/2025

Aceito em: 01/07/2025