

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES EM CANOAS-RS COM DADOS SENTINEL-2A E NDWI: ANÁLISE DE UM EVENTO EXTREMO DE 2024

Maria Eliana Barreto Druzian¹; Daniel Gustavo Allasia Piccilli²

Abstract: The extreme climatic event that struck Rio Grande do Sul state, Brazil, between April and May 2024, highlighted the urgent need for effective tools for mapping and analyzing flooded areas. This study aimed to apply the Normalized Difference Water Index (NDWI), using Sentinel-2A satellite imagery, to identify and quantify inundated surfaces in the municipality of Canoas, RS. The methodology employed freely available geospatial data and the open-source QGIS software, enabling an accessible and replicable approach. Images from before (April 21, 2024) and after the peak of the rainfall event (May 06, 2024) were analyzed, allowing for a spatial and temporal comparison of the flood extent. The application of NDWI proved effective in delineating the affected areas, providing crucial support for decision-making. The generated cartographic products not only support emergency response but also contribute to urban planning and risk mitigation strategies, aligning with established practices in disaster monitoring. The integration of remote sensing with spatial analysis is reaffirmed as a fundamental tool in the context of extreme events, enabling faster and more targeted responses.

Resumo: O evento climático extremo que atingiu o Rio Grande do Sul entre abril e maio de 2024 salientou a urgência por ferramentas eficazes de mapeamento e análise de áreas inundadas. Este estudo objetivou aplicar o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), a partir de imagens do satélite Sentinel-2A, para identificar e quantificar as superfícies alagadas no município de Canoas, RS. A metodologia empregou dados geoespaciais de acesso livre e o software de código aberto QGIS, viabilizando uma abordagem acessível e replicável. Foram analisadas imagens de antes (21/04/2024) e após o pico do evento chuvoso (06/05/2024), permitindo uma comparação espacial e temporal da extensão das inundações. A aplicação do NDWI demonstrou eficácia na delimitação das áreas atingidas, fornecendo subsídios cruciais para a tomada de decisão. Os produtos cartográficos gerados não apenas apoiam a resposta emergencial, mas também contribuem para o planejamento urbano e estratégias de mitigação de riscos, alinhando-se com práticas consolidadas no monitoramento de desastres. A integração do sensoriamento remoto com a análise espacial reafirma-se como ferramenta fundamental em contextos de eventos extremos, capacitando respostas mais ágeis e direcionadas.

Palavras-Chave: NDWI; Sentinel-2A; Inundações.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e o aumento da frequência de eventos extremos têm intensificado a vulnerabilidade das cidades brasileiras a desastres naturais, especialmente inundações. Esses eventos se destacam não apenas pelos impactos materiais e ambientais, mas, sobretudo, pelas perdas humanas

1) Universidade Federal de Santa Maria, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Avenida Roraima, 1000, Bairro Camobi, CEP: 97105-900, Santa Maria, RS, edruzian02@gmail.com.

2) Universidade Federal de Santa Maria, Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Avenida Roraima, 1000, CEP: 97015-9000, (55) 32208000, dga@gmail.com

e sociais, exigindo respostas mais eficientes e planejamento territorial embasado em dados confiáveis (Gerardo et al., 2023). A região metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, é marcada por uma dinâmica ambiental vulnerável a inundações, especialmente em municípios com topografia plana e alta densidade urbana, como é o caso de Canoas. A cidade possui um histórico recorrente de eventos extremos, com destaque para alagamentos que afetam principalmente as áreas de menor altitude e maior adensamento populacional. Estudos recentes destacam que as enchentes recorrentes têm deixado marcas profundas na vida da população local, tanto no campo material quanto no emocional, exigindo políticas públicas mais eficazes para prevenção e enfrentamento desses desastres (Gonçalves et al., 2024).

Diante da emergência climática que afetou o estado entre abril e maio de 2024, ressalta-se a importância crucial da aplicação de métodos ágeis e precisos para identificar as áreas atingidas pelas inundações. Nesse contexto, a Cartografia, o Geoprocessamento e, em particular, o Sensoriamento Remoto, consolidam-se como ferramentas essenciais, permitindo a geração de mapas temáticos e a análise espacial de zonas de risco a partir de imagens de satélite e dados públicos (Rizzatti & Batista, 2024).

Entre as técnicas de Sensoriamento Remoto, o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), proposto por McFeeters (1996), destaca-se pela sua ampla utilização na detecção de corpos d'água e superfícies alagadas. Sua aplicação em séries temporais de imagens orbitais possibilita o acompanhamento da evolução espacial de eventos de inundaçāo, auxiliando em estratégias de resposta e mitigação (Xu, 2006; Kashyap et al., 2022). Pesquisas no Brasil e em Portugal evidenciam que a integração dos resultados do NDWI com dados do Censo Demográfico permite não apenas mapear a extensão hídrica, mas também estimar o número de residências e a população afetada (Rizzatti & Batista, 2024; Gerardo et al., 2023).

Nesse contexto, e considerando a recente emergência em Canoas, o presente estudo objetiva aplicar o NDWI sobre imagens Sentinel-2A para mapear as áreas inundadas no município, utilizando ferramentas livres como o QGIS e dados geoespaciais de acesso aberto. A análise temporal, contrastando imagens anteriores e posteriores ao evento chuvoso de maio de 2024, busca não apenas delimitar a mancha de inundaçāo, mas também integrar essas informações ao contexto populacional e territorial da cidade. Pretende-se, assim, demonstrar a contribuição significativa de tecnologias acessíveis para o aprimoramento do planejamento urbano, da gestão de riscos e da formulação de políticas públicas mais eficazes em cenários de desastre.

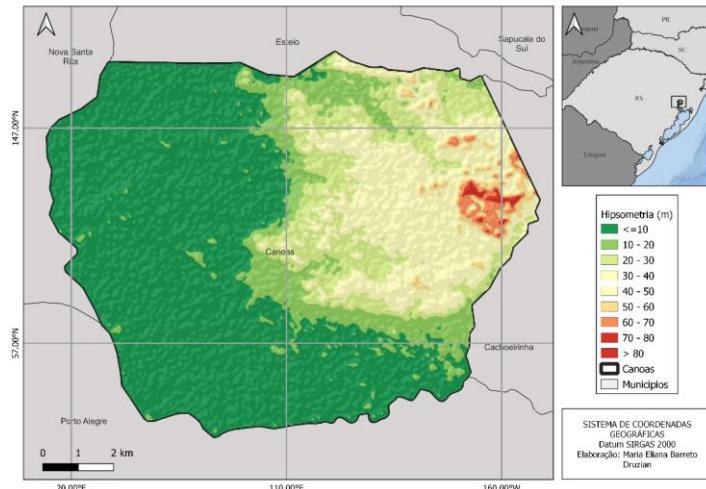
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

O município de Canoas, localizado na Região Metropolitana de Porto Alegre (RS), com uma extensão territorial de 130,67 Km², apresenta características que o tornam especialmente vulnerável a eventos de inundaçāo. Com uma população urbana de 347.657 habitantes (IBGE, 2024), sua ocupação se dá sobre uma planície com altitudes variando de 0 a 93 metros, o que, associado à presença do Rio dos Sinos e à insuficiência dos sistemas de drenagem urbana, favorece o acúmulo de água durante períodos de chuva intensa, como o observado no evento extremo de abril-maio de 2024 (Oliveira Filho et al., 2020; Rizzatti & Batista, 2024).

A Figura 1 apresenta o mapa hipsométrico da área de estudo, indicando as zonas mais suscetíveis a alagamentos, localizadas predominantemente nas porções de menor elevação. Essas características topográficas e urbanísticas justificam a escolha de Canoas como foco da análise cartográfica.

Figura 1: Mapa hipsométrico e localização da área de estudo no município de Canoas, RS.



2.2 Dados Utilizados

Foram utilizadas imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2A, da missão Copernicus, obtidas nas seguintes datas:

- 21 de abril de 2024 – antes do evento chuvoso extremo
- 06 de maio de 2024 – após as inundações

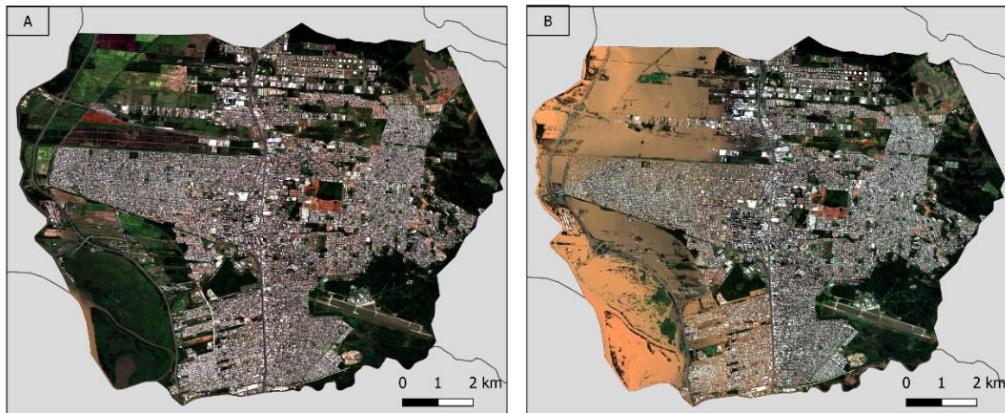
As imagens foram adquiridas por meio da plataforma Copernicus Open Access Hub, apresentando resolução espacial de 10 metros nas bandas relevantes para este estudo. As bandas empregadas no cálculo do NDWI foram a Banda 3 (Verde) e a Banda 8 (Infravermelho Próximo – NIR), conforme a formulação original de McFeeters (1996) e aplicações recentes (e.g., Gerardo et al., 2023). As características dessas bandas estão detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Bandas espectrais utilizadas para cálculo do NDWI com Sentinel-2A.

Banda	Nome	Comprimento de onda (nm)	Resolução (m)	Finalidade no contexto NDWI
B03	Verde (Green)	560	10	Mede a reflectância da água no espectro visível
B08	Infravermelho Próximo	842	10	Mede a reflectância no infravermelho próximo, fortemente absorvida pela água.

A Figura 2 exibe as composições em cor verdadeira (RGB) geradas a partir das imagens multiespectrais do satélite Sentinel-2A.

Figura 2: Imagens de satélite Sentinel-2A do município de Canoas. (A) Composição RGB em 21 de abril de 2024 (pré-inundação) e (B) Composição RGB em 06 de maio de 2024 (pós-inundação)



Ambas as cenas foram obtidas em condições atmosféricas favoráveis, com mínima ou nenhuma cobertura de nuvens sobre a área de interesse, o que permitiu uma comparação visual nítida entre os dois cenários. Diferenças perceptíveis na coloração e no brilho de determinadas áreas na imagem pós-evento (Figura 2B) já sugerem, de forma preliminar, a saturação do solo e o acúmulo de água em regiões urbanas e periféricas, especialmente nas zonas de menor altitude. Contudo, é a aplicação do NDWI que possibilita uma análise quantitativa e objetiva dessas alterações, permitindo a delimitação precisa das áreas afetadas pelas inundações. A eficácia das imagens do Sentinel-2A para esse tipo de monitoramento em contextos urbanos submetidos a eventos extremos é corroborada por estudos anteriores (Kashyap et al., 2022).

2.3 Processamento de Dados e Cálculo do NDWI

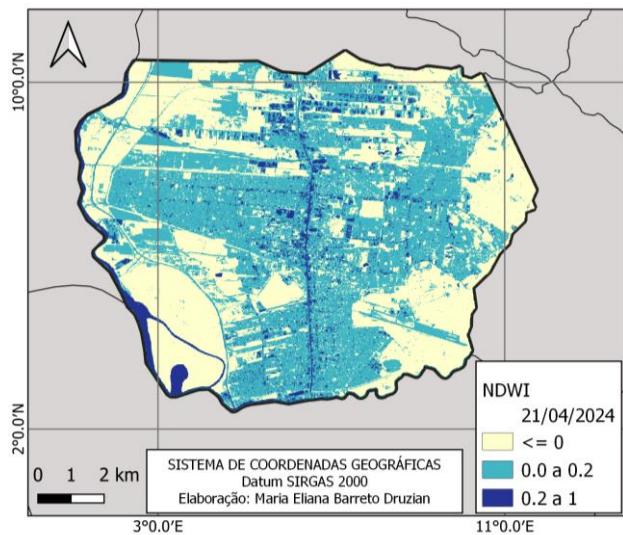
O processamento das imagens foi realizado no software de código aberto QGIS (versão 3.16), utilizando ferramentas de análise raster para a aplicação do NDWI. O índice foi calculado com base nas bandas Verde (B03) e Infravermelho Próximo – NIR (B08) do satélite Sentinel-2A, conforme a equação (1) proposta por McFeeters (1996):

$$NDWI = \frac{(B03 - B08)}{(B03 + B08)} \quad (1)$$

Essa fórmula é amplamente utilizada para a detecção de corpos d'água e áreas alagadas, devido à sua eficácia na distinção entre superfícies com presença de água e outros elementos como solo seco ou vegetação (McFeeters, 1996; Xu, 2006). Para este estudo, valores de NDWI superiores a 0,2 foram considerados indicativos de água/áreas inundadas, um limiar comum em estudos dessa natureza e alinhado com metodologias recentes (Galehtemouri et al., 2024; Rizzatti & Batista, 2024).

A Figura 3 apresenta o resultado do cálculo do NDWI referente à data de 21 de abril de 2024, caracterizando o cenário pré-inundação. As áreas com valores de NDWI entre 0,2 e 1 (representadas em tons de azul escuro) indicam a presença de corpos d'água estabelecidos ou áreas já saturadas/inundadas. Valores de NDWI entre 0,0 e 0,2 (tons de azul claro) podem corresponder a solos úmidos ou vegetação com alto teor de umidade, enquanto valores inferiores ou iguais a 0 (representados por tons de amarelo claro) estão tipicamente associados à vegetação saudável, solo seco ou superfícies urbanas impermeáveis.

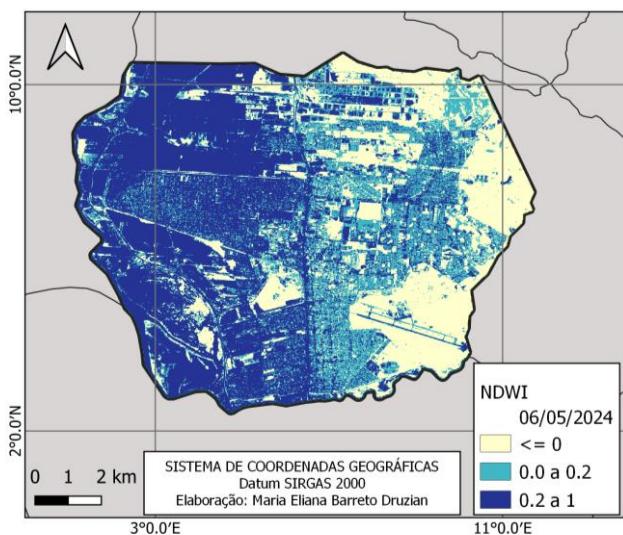
Figura 3: Mapa gerado a partir do NDWI em Canoas na data de 21 de abril de 2024 (pré-inundação).



O mapa evidencia uma discreta presença de áreas com $NDWI > 0,2$ (azul escuro), concentradas sobretudo nas margens do Rio dos Sinos e em zonas úmidas conhecidas, como áreas de várzea. Esses resultados refletem a condição hidrológica relativamente estável do município antes do evento de precipitação extrema, reforçando o papel do NDWI como ferramenta de monitoramento e comparação temporal em contextos de risco (Kashyap et al., 2022).

A Figura 4, por sua vez, ilustra o resultado do NDWI para 06 de maio de 2024, evidenciando a expansão significativa das áreas inundadas após o evento chuvoso que atingiu Canoas. Observa-se uma ampliação notável das zonas com valores de NDWI entre 0,2 e 1 (azul escuro), indicando o avanço do alagamento sobre o território.

Figura 4: Mapa gerado a partir do NDWI mostrando as áreas inundadas em Canoas após o evento chuvoso, em 06 de maio de 2024 (pós-inundação).



Comparada à Figura 3, é possível verificar na Figura 4 que extensas áreas, incluindo zonas urbanas anteriormente secas (com $NDWI \leq 0$), passaram a apresentar valores de NDWI característicos de inundação ($NDWI > 0,2$), especialmente nas porções de menor altitude do município. A partir desses resultados, as áreas efetivamente alagadas foram quantificadas. Para isso, os pixels com valores de NDWI superiores a 0,2 foram isolados (por meio de reclassificação do raster

NDWI para criar um mapa binário de água/não-água) e suas respectivas áreas foram calculadas utilizando o plugin r.report no QGIS. Esta abordagem permitiu uma comparação quantitativa da mancha de inundação entre os dois períodos, conforme detalhado na Tabela 2, que evidencia a magnitude e a distribuição espacial das áreas afetadas no município.

Tabela 2 – Síntese das áreas alagadas/inundadas no município de Canoas em comparação com o tamanho territorial.

Data	Área Total (Km ²)	Área com água e inundações (Km ²)	Área seca (Km ²)	Percentual (%) área com água
21/04/2024	130,67	40,3	90,37	31
06/05/2024	130,67	81,53	49,14	62

A análise comparativa entre as imagens de 21 de abril e 06 de maio de 2024, por meio dos valores de NDWI, permitiu identificar de forma precisa as áreas que apresentaram acúmulo expressivo de água após o evento extremo de chuvas. Essa variação temporal evidenciou mudanças significativas na cobertura hídrica, reforçando a eficácia do NDWI na detecção e quantificação de superfícies alagadas em ambiente urbano (Abdulrazzaq et al., 2018; Kashyap et al., 2022).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do NDWI em imagens Sentinel-2A revelou-se eficaz no mapeamento das áreas inundadas no município de Canoas-RS durante o evento climático extremo de abril e maio de 2024. A análise comparativa entre as imagens de 21 de abril e 06 de maio de 2024 demonstrou uma clara expansão das áreas com valores de NDWI superiores a 0,2, indicando alta probabilidade de presença de água superficial após a intensificação das chuvas.

No mapa gerado para o dia 21 de abril de 2024 (**Figura 3**), que representa o cenário pré-inundação, observou-se uma concentração de áreas com $NDWI > 0,2$ (coloração azul escura) principalmente na porção sul do município, correspondendo a corpos d'água preexistentes e áreas úmidas, com algumas ocorrências isoladas no centro e norte. Por outro lado, a imagem de 06 de maio de 2024 (Figura 4) revela a notável progressão das áreas alagadas. A metade oeste foi quase inteiramente coberta por tons de azul escuro, que indicam alta presença de água (NDWI elevado), com a inundação se estendendo em direção ao centro do município. Adicionalmente, o mapa aponta o surgimento de novos focos de alagamento em diversas outras localidades, o que reflete a severidade do evento climático analisado.

A comparação visual dos mapas de inundação (**Figuras 3 e 4**) com o mapa hipsométrico de Canoas (**Figura 1**) sugere uma forte correlação entre as áreas identificadas como inundadas ($NDWI > 0,2$) e as regiões de menor elevação. As extensas áreas representadas em verde escuro no mapa hipsométrico, indicando as menores altitudes (frequentemente inferiores a 10 metros), coincidem espacialmente com as zonas de maior concentração de valores elevados de NDWI, especialmente na imagem de 06 de maio de 2024. Esse resultado está em consonância com o princípio hidrológico de que a água tende a se acumular nas partes mais baixas da topografia.

A metodologia empregada, baseada em dados de acesso livre do Sentinel-2A e ferramentas de código aberto como o QGIS, demonstra a viabilidade de uma abordagem de baixo custo e replicável para o monitoramento de desastres. A capacidade de gerar mapas de inundação em diferentes momentos permite uma análise temporal da dinâmica do evento, crucial para a compreensão da progressão e do impacto das inundações. Embora não tenha sido o escopo do presente trabalho, a

integração futura destes resultados de NDWI com informações demográficas detalhadas (como dados censitários em nível de setor) possui um grande potencial. Conforme exemplificado em estudos semelhantes (Rizzatti & Batista, 2024; Gerardo et al., 2023), tal sobreposição permitiria estimar com maior precisão as residências e os contingentes populacionais situados em áreas de risco, informação crucial para o planejamento de ações de resposta emergencial e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de riscos a longo prazo.

Em suma, a aplicação do NDWI utilizando imagens Sentinel-2A demonstrou ser uma ferramenta valiosa para o mapeamento e a análise da extensão das inundações em Canoas durante o evento extremo de 2024. Os resultados obtidos evidenciam a capacidade do sensoriamento remoto em fornecer informações geográficas cruciais para a gestão de desastres, reforçando a importância da combinação de dados espectrais com informações topográficas para uma melhor compreensão dos processos de inundaçāo. Estudos futuros poderiam, além da já mencionada integração com dados demográficos, explorar a calibração de limiares do NDWI específicos para a região de Canoas e a integração com modelos hidrológicos para uma previsão e análise ainda mais robusta das áreas de risco.

4 CONCLUSÃO

Este estudo aplicou o Índice de Água por Diferença Normalizada (NDWI), com base em imagens do satélite Sentinel-2A processadas no software QGIS, para mapear e analisar as áreas afetadas pelas inundações ocorridas em Canoas, RS, durante o evento climático extremo de abril e maio de 2024. A metodologia demonstrou elevada eficácia na detecção e quantificação de áreas alagadas, evidenciando sua utilidade como ferramenta de suporte ao monitoramento de desastres em contextos urbanos.

Os resultados obtidos indicaram uma expansão significativa das áreas com acúmulo de água entre 21 de abril e 06 de maio de 2024, especialmente em regiões de baixa altitude (inferiores a 10 metros), onde a topografia plana do município contribuiu para o agravamento e a extensão dos alagamentos. A mancha de inundaçāo identificada em 06 de maio de 2024 recobriu vastas porções do território municipal, incluindo áreas densamente urbanizadas, o que pressupõe um impacto social e econômico considerável, embora a quantificação específica desse impacto sobre a população não tenha sido objeto desta análise inicial.

A utilização de dados de sensoriamento remoto, como o NDWI, associada a informações geográficas como a hipsometria, reforça a importância de abordagens geotecnológicas para a compreensão da dinâmica dos eventos extremos. Ferramentas de código aberto, como o QGIS, e bases de dados acessíveis potencializam a capacidade de resposta e planejamento de instituições públicas, ampliando o alcance e a aplicabilidade desses métodos. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a integração dos mapas de inundaçāo gerados com dados demográficos detalhados, a fim de estimar o número de pessoas e domicílios afetados, o que forneceria subsídios ainda mais valiosos para o planejamento urbano, a definição de zonas de risco e a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação de desastres naturais.

Dessa forma, este trabalho destaca o potencial do sensoriamento remoto como aliado na construção de cidades mais resilientes, sendo essencial para orientar ações preventivas e emergenciais frente às mudanças climáticas. Pesquisas futuras podem aprofundar essa abordagem com o uso de dados de maior resolução espacial e temporal, a integração com outros índices espectrais, bem como incorporar sensores multiespectrais e sistemas de alerta em tempo real, aprimorando ainda mais as estratégias de resposta e adaptação a desastres hidrológicos.

REFERÊNCIAS

- ABDULRAZZAQ, Z. T.; AZIZ, N. A.; MOHAMMED, A. A. (2018). "Flood modelling using satellite-based precipitation estimates and digital elevation model in eastern Iraq." *International Journal of Advanced Geosciences*, v. 6, n. 1, pp. 72-77.
- GALEHTEIMOURI, S.; MAHDAVI, M.; AGHSAEI, M. H.; MEHDIPOUR, A. (2024). "Flood detection and mapping using Sentinel-2 imagery and NDWI in QGIS: A case study in Iran". *Environmental Monitoring and Assessment*, **196**(1), pp. 1–13.
- GERARDO, L. L.; GOMES, R. A.; DIAS, H. C. T. (2023). "Análise de áreas de inundação urbana em Portugal utilizando sensoriamento remoto". *Revista Brasileira de Cartografia*, **75**(2), pp. 189–203.
- GONÇALVES, C. G. V.; TESTA, J. R.; DE BEM, J. S.; WAISMANN, M. (2024). "Memórias e reflexões sobre as enchentes em Canoas (RS): como superar esses traumas?". *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, **26**(1), pp. 74–95.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). "Censo Demográfico 2022: Resultados Preliminares". Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br>
- KASHYAP, S.; GHOSH, S.; RAKESH, K. (2022). "Application of Sentinel-2 data for flood inundation mapping using NDWI and NDBI indices". *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, **25**, 100678.
- MCFEETERS, S. K. (1996). "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features". *International Journal of Remote Sensing*, **17**(7), pp. 1425–1432.
- OLIVEIRA FILHO, P. R.; BASSO, D. A.; LIMA, L. C. (2020). "Análise da suscetibilidade à inundação na Bacia Hidrográfica do Arroio Areia em Canoas-RS". *Revista Geografia*, **29**(2), pp. 129–144.
- RIZZATTI, G. C.; BATISTA, G. T. (2024). "Mapeamento de áreas urbanas inundadas no Rio Grande do Sul utilizando imagens Sentinel-2 e dados do Censo Demográfico". *Revista Brasileira de Geografia Física*, **17**(3), pp. 743–760.
- XU, H. (2006). "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery". *International Journal of Remote Sensing*, **27**(14), pp. 3025–3033.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado para a realização do projeto de pesquisa. Estendo meus agradecimentos ao grupo de estudos ECOTECNOLOGIAS, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), pelo apoio e discussões enriquecedoras.