

DEFINIÇÃO DAS ÁREAS PROPENSAS À INUNDAÇÃO COM USO DE MODELO HIDRÁULICO 2D DO IBER: CASO DE ESTUDO DE ESTRELA E LAJEADO/RS - BRASIL

ANDERSON AUGUSTO VOLPATO SCOTI¹ CARLOS VALDIR DE MENESES BATEIRA² LUIS EDUARDO DE SOUZA ROBAINA¹ SUSANA PEREIRA² ROMARIO TRENTIN¹ 

RESUMO – No Rio Grande do Sul/Brasil, muitas cidades são afetadas frequentemente por inundações, onde Estrela e Lajeado são exemplos. A utilização de modelos hidráulicos 2D auxiliam na identificação das manchas e das cotas de inundação. Neste contexto, os objetivos deste trabalho são: i) definir as áreas inundáveis e altura da água nas áreas urbanas de Estrela e Lajeado com base num modelo hidráulico 2D, ii) identificar o número de edificações e tipos de uso e cobertura expostos e iii) validar os resultados com trabalho de campo e histórico de inundações passadas. O processamento do modelo hidráulico ocorreu no IBER 2.5.1 com base em dados secundários. A validação do modelo deu-se por meio da comparação dos resultados com outro modelo hidráulico e dados de campo. Os dados indicaram uma satisfatória similaridade do modelo hidráulico 2D obtido com o IBER, tanto com os dados divulgados pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com uma sobreposição espacial de 92,6% e 95,9% em Estrela e Lajeado, respetivamente. Os resultados permitiram quantificar de forma expedita as edificações, verificando-se que Lajeado possui 1958 e Estrela 3385 construções expostas, além dos tipos de uso e cobertura da terra que estão localizados em porções inundáveis do rio Taquari-Antas nas áreas urbanas dos dois municípios. Este trabalho contribui para a gestão da emergência e da resposta aos eventos de inundações. O modelo 2D gerado no IBER se mostrou uma opção adequada ao planejamento estratégico e apresenta-se como uma ferramenta para a prevenção dos danos e perdas gerados por eventos de inundação.

Palavras-chave: Desastres naturais; inundações; geoprocessamento; modelo hidráulico; IBER.

ABSTRACT – DEFINITION OF FLOOD-PRONE AREAS USING THE IBER 2D HYDRAULIC MODEL: CASE STUDY OF ESTRELA AND LAJEADO/RS - BRAZIL. In Rio Grande do Sul, Brazil, many cities are frequently affected by floods, with Estrela and Lajeado being notable examples. The use of 2D hydraulic models aids in identifying flood areas and water levels. In this context, the objectives of this work are: i) to define the flood-prone areas and water heights in the urban areas of Estrela and Lajeado based on a 2D hydraulic model; ii) to identify the number of buildings and types of land use and cover exposed; and iii) to validate the results with fieldwork and historical flood data. The hydraulic model was processed using IBER 2.5.1, based on secondary data. The validation of the model was carried out by comparing the results with another hydraulic model and field data. The data indicated a satisfactory similarity of the 2D hydraulic model obtained with IBER, both with the data published by the Hydraulic Research Institute of the Federal University of Rio Grande do Sul, showing a spatial overlap of 92.6% and 95.9% in Estrela and Lajeado, respectively. The results allowed for a prompt quantification of the buildings, revealing that Lajeado has 1,958 and Estrela has 3,385 exposed constructions, in addition to the types of land use and cover located in flood-prone areas of the Taquari-Antas River in the urban areas of both municipalities. This work contributes to the management of emergencies and responses to flood events. The 2D model generated in IBER proved to be a suitable option for strategic planning and serves as a tool for preventing damage and losses caused by flood events.

Keywords: Natural disasters; floods; geoprocessing; hydrological models; IBER.

RESUMEN – DEFINICIÓN DE ÁREAS PROPENSAS A INUNDACIONES UTILIZANDO MODELO HIDRÁULICO 2D DEL IBER: ESTUDIO DE CASO DE ESTRELA Y LAJEADO/RS - BRASIL. En el Río Grande del Sur, Brasil, muchas ciudades son frecuentemente afectadas por inundaciones, siendo Estrela y Lajeado ejemplos notables. La utilización de modelos hidráulicos 2D ayuda a identificar las áreas inundables y los niveles de agua. En este contexto, los objetivos de este

Recebido: 05/04/2024. Aceite: 25/09/2024. Publicado: 14/10/2024.

¹ Departamento de Geociências, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Prédio 13, Avenida Roraima, nº 1000, Bairro Camobi, 97105-900, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: anderson.sccoti@ufsm.br, lesrobaina@yahoo.com.br, romario.trentin@gmail.com

² Departamento de Geografia, Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território, Faculdade de Letras, Universidade do Porto, Porto, Portugal. E-mail: carlosbateira@gmail.com, sspereira@letras.up.pt

trabajo son: i) definir las áreas propensas a inundaciones y la altura del agua en las áreas urbanas de Estrela y Lajeado basándose en un modelo hidráulico 2D; ii) identificar el número de edificaciones y los tipos de uso y cobertura del suelo expuestos; y iii) validar los resultados con trabajo de campo e históricos de inundaciones pasadas. El procesamiento del modelo hidráulico se realizó en IBER 2.5.1, utilizando datos secundarios. La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados con otro modelo hidráulico y datos de campo. Los datos indicaron una similitud satisfactoria del modelo hidráulico 2D obtenido con IBER, tanto con los datos publicados por el Instituto de Investigaciones Hidráulicas de la Universidad Federal de Río Grande del Sur, mostrando una superposición espacial del 92,6% y 95,9% en Estrela y Lajeado, respectivamente. Los resultados permitieron cuantificar de manera expedita las edificaciones, revelando que Lajeado tiene 1.958 y Estrela 3.385 construcciones expuestas, además de los tipos de uso y cobertura del suelo ubicados en áreas inundables del río Taquari-Antas en las áreas urbanas de ambos municipios. Este trabajo contribuye a la gestión de emergencias y a la respuesta ante eventos de inundaciones. El modelo 2D generado en IBER se demostró como una opción adecuada para la planificación estratégica y se presenta como una herramienta para la prevención de daños y pérdidas causadas por eventos de inundación.

Palavras chave: Catástrofes naturais; inundaciones; geoprocessamiento; modelo hidrológico; IBER.

I. INTRODUÇÃO

A História relata a importância dos rios para o desenvolvimento das sociedades. Várias aglomerações humanas foram constituídas nas margens dos rios, os quais proviam as necessidades sociais, no que se refere a transporte, abastecimento de água, irrigação e sedimentos. O regime de um rio é controlado pela disponibilidade de água superficial e subsuperficial ao longo das estações do ano. Em períodos de elevação do volume/disponibilidade de água, é comum que um rio, ao receber uma vazão mais volumosa de seus tributários exceda o leito normal e ocupe sua planície de inundação (Grotzinger & Jordan, 2013). Este processo natural e sazonal da dinâmica de um rio depende das características da sua bacia hidrográfica.

Os rios e as bacias hidrográficas têm sofrido cada vez mais com as alterações feitas pela sociedade, em especial nos países em desenvolvimento (Alcantara-Ayala, 2002), o que combinado com alterações climáticas abruptas, tem gerado modificações nos regimes fluviais. As consequências de uma relação conflituosa entre sociedade e natureza resultam em danos e perdas para as duas partes.

Neste contexto, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com foco na análise e mapeamento dos desastres naturais associados a dinâmica fluvial e na redução dos danos causados por esses eventos, considerando que para planejar é necessário conhecer o problema no maior nível de detalhe possível (Brito & Evers, 2016; Istomina & Dobrovoski, 2016; Kandilioti & Makropoulos, 2012; Luu *et al.*, 2018; Luz & Rodrigues, 2020; Martins *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019; Saueressig & Robaina, 2015; Sausen & Narvaes, 2015; Ramos *et al.*, 2018).

O uso de técnicas de geoprocessamento associadas à estatística, tem originado modelos preditivos de áreas inundáveis, que tem grande potencial para serem utilizados na redução dos danos causados por eventos extremos que atingem áreas densamente ocupadas. Os modelos hidráulicos têm contribuído na identificação das áreas atingidas por inundações, enxurradas e alagamentos (Guasselli *et al.*, 2016) e na quantificação/predição da perda de solo e degradação em sistemas naturais (Trentin *et al.*, 2021). A modelação bidimensional (2D) da inundação fluvial na sua planície de inundação, contribui para compreender suas características (e.g. área inundável, altura da água e velocidade do escoamento fluvial). Este tipo de modelação vem sendo utilizada nas últimas décadas para a realização do mapeamento da suscetibilidade a inundações. Comumente, são utilizados modelos matemáticos hidráulicos 1D e 2D (conceituais ou empíricos) para representar fenômenos envolvidos de ordem hidráulica, os quais determinam as cotas (1D e 2D) e as áreas inundadas (2D) (Almeida & Serra, 2017; Bladé *et al.*, 2008; Bulti & Abebe, 2020; Dimitriadis *et al.*, 2016; Martínez-Cantó & Hidalgo, 2016).

O *software* IBER permite a modelação matemática 2D de águas superficiais e simular o comportamento do escoamento da superfície livre de rios, com base em dados hidrológicos, (Bladé *et al.*, 2014). O desenvolvimento do *software* IBER resulta da cooperação entre instituições de ensino superior espanholas para auxiliar nas necessidades técnicas dos comitês de bacia hidrográfica e na aplicação de legislações específicas. Os parâmetros de entrada necessários para a modelação incluem a vazão (Qp), tempo de concentração (TC) e informações sobre a rugosidade do terreno baseadas no uso e cobertura da terra (valores de Manning). Os resultados são cenários bidimensionais com altura da água, elevação, velocidade, entre outros (Bladé *et al.*, 2014).

Os modelos hidráulicos bidimensionais do IBER possibilitam representar cartograficamente as áreas propensas a ocorrência de inundação, utilizando um de código aberto, distribuído gratuitamente em inglês e espanhol. O IBER apresenta uma interface, relativamente, amigável onde um operador com conhecimentos básicos de geoprocessamento e hidrologia consegue, sem muitas dificuldades, gerar um modelo hidráulico (mais informações podem ser obtidas no link: <https://www.iberaula.es/>).

A aplicação dos modelos hidráulicos bidimensionais do IBER de águas superficiais serve como apoio à tomada de decisão e auxiliam nas medidas mitigatórias. Na posse dessas informações, gestores e técnicos das prefeituras e da defesa civil podem sistematizar suas ações para gestão do risco e reduzir os danos causados a pessoas e moradias alocadas em planícies de inundação. O modelo 2D gerado no IBER, apresenta-se como uma alternativa de fácil aplicação e que contribuiu na definição das áreas inundável, na predição da altura da água e da velocidade do escoamento, durante episódios de elevação de caudal (Bladé *et al.*, 2014; Camargo *et al.*, 2012; Fernández-Nóvoa *et al.*, 2024; Fonseca *et al.*, 2018; Garcia-Feal *et al.*, 2018; Garcia *et al.*, 2022).

Com a expansão das áreas urbanas no Brasil, em especial a partir de 1970, fruto do êxodo rural promovido pela Revolução Verde, importantes parcelas da população acabaram ocupando as planícies de inundação (Maricato, 1995; Menezes *et al.*, 2020; Robaina & Trentin, 2013; Teló & David, 2012). Esse processo ocorreu, inevitavelmente, nos municípios de Estrela e Lajeado no Rio Grande Sul. Tal situação gera como consequência a ampliação dos danos e perdas em episódios de inundação fluvial (Borges *et al.*, 2024; Eckhardt *et al.*, 2009; Reckziegel, 2007).

Alguns modelos hidráulicos já foram aplicados na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, como é o exemplo do trabalho de Laipelt *et al.* (2023), onde os autores, por meio do uso de sensoriamento remoto, definiram as manchas de inundação nas áreas urbanas dos municípios de Santa Tereza, Muçum, Encantado, Roca Sales, Lajeado e Estrela. Eckhardt *et al.* (2009), utilizando técnicas de geoprocessamento e levantamento topográfico, definiram as porções inundáveis com base em diferentes cotas na área urbana de Lajeado. O modelo 2D gerado no IBER é uma alternativa de modelagem, que usa como base *softwares* e produtos de geoprocessamento, acessíveis a pesquisadores, estudantes e gestores municipais.

Neste contexto, esse artigo tem três objetivos principais a desenvolver na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas: (i) estimar as áreas inundáveis e a respetiva altura da água nas áreas urbanas de Estrela e Lajeado, utilizando um modelo hidráulico 2D gerado no IBER; (ii) identificar o número de edificações e os tipos de uso e cobertura da terra expostos às inundações e (iii) validar as áreas inundáveis e a altura da água obtida com o modelo 2D gerado no IBER.

II. ÁREA DE ESTUDO

Os municípios de Estrela e Lajeado (fig. 1) fazem parte da Bacia Hidrográfica (BH) do rio Taquari-Antas, a qual drena a porção nordeste do estado do Rio Grande do Sul, escoando em direção à depressão periférica, desaguando no rio Jacuí (Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura [SEMA], 2011). A área total da bacia hidrográfica é de 26 430km² com altitude máxima de 1266m, altitude média de 599,54m e a altitude mínima de 1m. As áreas urbanas dos municípios encontram-se nas margens direita (Lajeado) e esquerda (Estrela) do rio Taquari. Os eventos hidrológicos extremos na BH do Taquari-Antas, são deflagrados tanto por precipitações de longa duração associadas à passagem de frentes frias, como a episódios de precipitação de menor duração e grande volume, vinculadas a chuvas convectivas, mais típicas dos meses de verão (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais [CPRM] 2021; Rossato, 2011).

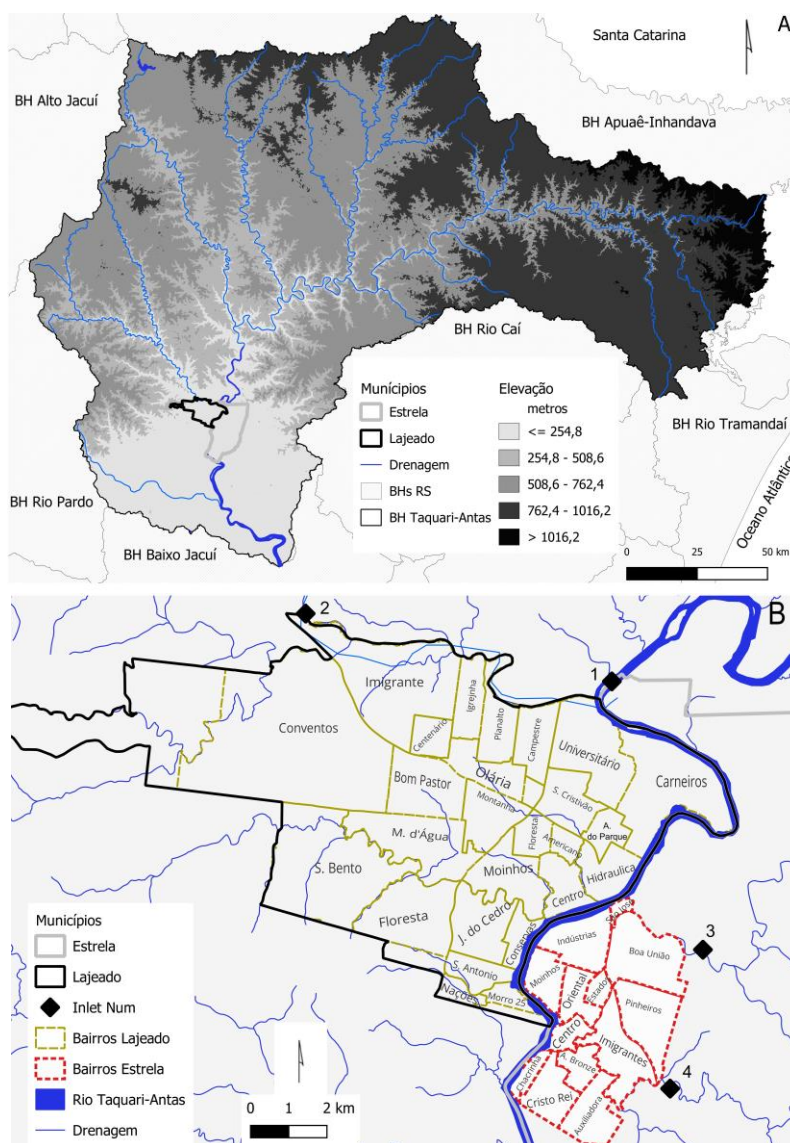


Fig. 1 – Bacia Hidrográfica do Taquari-Antas (a) e localização dos municípios de Estrela e Lajeado, Rio Grande do Sul (b). Figura a cores disponível online.

Fig. 1 – Hydrographic basin of Taquari-Antas (a) and location of the municipalities of Estrela and Lajeado, Rio Grande do Sul (b). Colour figure available online.

Estrela e Lajeado, conforme dados da Defesa Civil do Rio Grande do Sul, são cidades com muitos registros de eventos hidrológicos causadores de danos e perdas (Borges *et al.*, 2024; Eckhardt, *et al.*, 2009). Tendo por base os dados disponíveis em Borges *et al.*, 2024, foi possível identificar as datas dos eventos de inundação ocorridos nos municípios de Estrela e Lajeado, número de mortos e número de afetados (desalojados e desabrigados), entre 2000 e 2023. A distribuição dos eventos de inundação fluvial e número de afetados estimado pode ser visualizada na figura 2. As fontes referem um total de 52 eventos de inundação, que geraram 6416 afetados.

Nos últimos 23 anos, apenas em 2000 e 2004 não houve registros de eventos de inundação fluvial em Estrela e Lajeado. Dos 23 anos, nove apresentaram mais de três eventos por ano, com destaque aos anos de 2001, 2003 e 2009 que registraram mais de mil afetados. Em 2001, três pessoas morreram em Lajeado e uma em Estrela, vítimas dos eventos hidrológicos. Essa recorrência está vinculada a diferentes cotas de inundação previamente estudados por Borges *et al.* (2024). Com as inundações, muitas famílias ficaram desabrigadas ou desalojadas: no evento de fevereiro de 2003, 400 pessoas ficaram desabrigadas em Lajeado. Em Estrela, um evento registrado em outubro de 2016, deixou 60 famílias desabrigadas ou desalojadas.

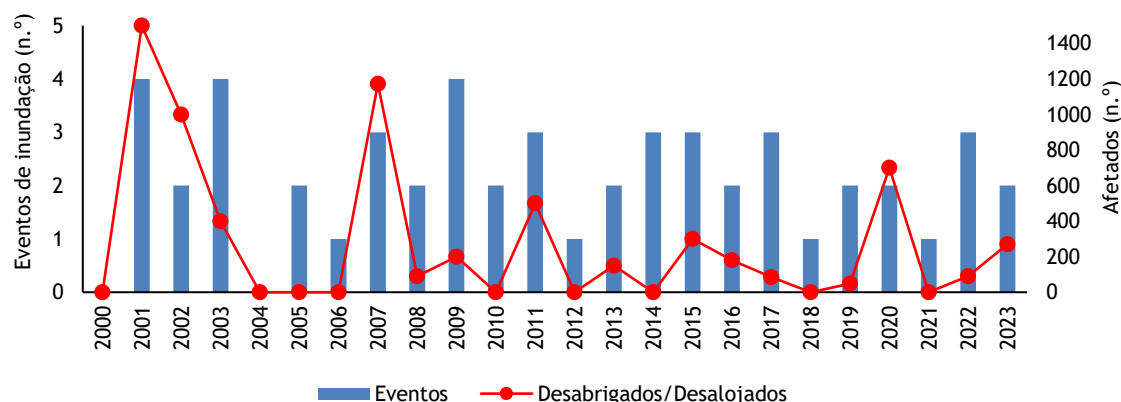


Fig. 2 – Número de eventos de inundação fluvial e afetados registrados nos municípios de Estrela e Lajeado, entre 2000 e 2023. Figura a cores disponível online.

Fig. 2 – Number of flood events and affected people recorded in the municipalities of Estrela and Lajeado, between 2000 and 2023. Colour figure available online.

Fonte: Zero Hora e Jornal A Hora

No início do mês de setembro de 2023, a região do vale do Rio Taquari-Antas passou por intensos episódios de precipitação e consequentes inundações nas áreas urbanas que tangenciam o rio principal. Durante esse evento, 50 vidas foram perdidas e centenas de pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas (METSUL Meteorologia [METSUL], 2024).

Em 2024, no início do mês de maio, o Rio Grande do Sul foi atingido por eventos extremos de precipitação, 179 pessoas morreram e 34 estavam desaparecidas (Portal de Notícias G1, 2024), a bacia hidrográfica do rio Taquari recebeu índices pluviométricos superiores a 600mm em poucos dias, desencadeando processos hidrológicos severos e com alto potencial destrutivo e que ainda não haviam sido registrados. As áreas urbanas localizadas próximas ao canal principal do rio Taquari foram atingidas, dentre elas Estrela e Lajeado, onde bairros inteiros foram destruídos (METSUL, 2024).

III. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho podem organizar-se em três fases distintas (fig. 3): (i) preparação dos dados de entrada no modelo hidráulico, incluindo dados de elevação, hidrograma de cheia e rugosidade; (ii) processamento do modelo 2D no IBER; (iii) validação dos resultados das áreas inundáveis e das cotas de inundação, comparando com o modelo do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS).

1. Dados de entrada

Para caracterizar a Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, foram utilizados dados altimétricos provenientes de imagens do *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), com resolução espacial de 30 metros, disponibilizados pelo serviço geológico dos Estados Unidos da América (USGS) e os relatórios da Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura do Rio Grande do Sul (SEMA). O Modelo Digital de Elevação (MDE) utilizado nas áreas urbanas de Estrela e Lajeado é proveniente de uma imagem do Alos Palsar, com resolução espacial de 12,5 metros, disponível no *site Alaska Satellite Facility* (<https://asf.alaska.edu/datasets/daac/alos-palsar/>), o MDE de melhor resolução espacial disponível para a área de estudo. Após o *download* da imagem procedeu-se com a correção de falhas com a ferramenta *r.fill.dir*, disponível no *Qgis 3.28*, após essa etapa foi recortada a área que cobriu as manchas urbanas de Estrela e Lajeado e na sequência, utilizando a ferramenta do *ArcGis® Raster to ASCII*, o MDE foi convertido de *.geotif em *.txt.

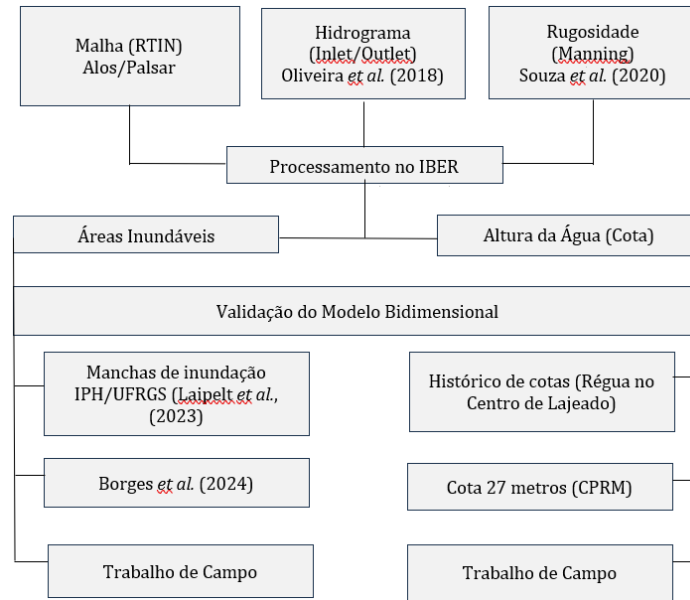


Fig. 3 – Esquema metodológico utilizado para o processamento e validação do modelo de inundação fluvial 2D no IBER.

Fig. 3 – Methodological scheme used to process and validate the 2D IBER riverine flood model.

Para desenvolver modelos preditivos que identifiquem áreas propensas a inundações, é essencial contar com um conjunto abrangente de dados hidrológicos. Essas informações são coletadas por estações fluviométricas e são disponibilizadas por agências especializadas, como a Agência Nacional de Águas (ANA), responsável por uma extensa rede de estações fluviométricas e pluviométricas. Da posse das séries históricas é possível obter dados de vazão, baseados em tempos de retorno, como apresentado por Gumbel (1941), Oliveira *et al.* (2018), Martins e Clarke (1993), Prina e Trentin (2018) e Tuyls *et al.* (2018). Com essas informações é possível estimar as áreas atingidas, sazonalmente e/ou excepcionalmente, por eventos hidrológicos.

Para a aplicação na definição das áreas inundáveis em Estrela e Lajeado, optou-se por utilizar os dados de vazão para o Rio Taquari-Antas disponíveis no trabalho de Oliveira *et al.* (2018). Nesta investigação, os autores calcularam para o rio principal e seus tributários, vazões com potencial de gerar enxurradas e inundações para tempos de retorno de cinco, dez, 20, 50 e 100 anos, definiram polígonos de áreas inundáveis a montante e a jusante de Estrela e Lajeado. Os valores de vazão disponibilizados pela ANA, foram testados pelos autores por meio das distribuições GEV, Gama, Gumbel e Log-Pearson Tipo III. O teste de Kolmogorov-Smirnov (significância de 0,05), foi utilizado para avaliar a similaridade entre as diferentes distribuições de probabilidade (Oliveira *et al.*, 2018). Os dados utilizados para simular a inundação para um tempo de retorno (PR) igual a 100 anos estão disponíveis no quadro I.

Quadro I – Informações hidrológicas utilizadas na definição de áreas inundáveis em Estrela e Lajeado.

Table I – Hydrological information used to define flood areas in Estrela and Lajeado.

Sub-bacia	Inlet Num	Tempo de concentração (horas)	Vazão (m ³ /s) PR 100 anos
Alto Rio Taquari	1	79,0	15 711
Rio Forqueta	2	25,1	3 023
Arroio Boa Vista	3	11,5	767
Arroio Estrela	4	8,6	360

Fonte: Oliveira *et al.* (2018).

Os valores de Manning foram inseridos através de uma malha em *.txt e um arquivo em *.csv, contendo os tipos de uso e cobertura da terra. Este coeficiente expressa as forças de atrito ao escoamento, como forma da margem, presença de vegetação e edificações. As classes utilizadas foram: rio (0,025), floresta (0,12), vegetação urbana (0,032), residencial (0,15) e agropecuária (0,035). Os valores de Manning foram atribuídos com base nos valores pré-existente no IBER, com exceção da classe “agropecuária” que tem como base o trabalho de Burmester (2004).

As informações de uso e cobertura da terra foram obtidas na coleção do *MapBiomias* (Souza *et al.*, 2020), tendo por referência o ano de 2022. Dada a escala de análise e os dados disponíveis, não foi executada a análise de perfis transversais e longitudinais do rio, sendo que a ausência dessas informações não limita a obtenção do modelo hidráulico no IBER, diferente de outros *softwares*, como é caso do HEC-RAS, onde esses parâmetros são obrigatórios.

2. Processamento no IBER

Na posse dos dados hidrológicos, iniciou-se as atividades no *software IBER* versão 2.5.2. As bases de dados inseridas no IBER devem estar em formato de grades triangulares formando uma malha, isto inclui o MDE e os parâmetros de Manning (uso e cobertura da terra) os quais foram convertidos de matriz (raster) para *.txt. O que pode ser considerada uma limitação do IBER é o fato de aceitar ou processar de maneira mais eficiente, dados projetados em WGS 1984 e em sistema de coordenadas UTM. Outra questão, para que o programa reconheça os valores de Manning, é necessário que a nomenclatura das classes não possua nenhum caráter de espaço e a camada seja maior que a grade triangular, caso essas características não sejam observadas, o processamento apresentará erro.

As informações de uso e cobertura da terra foram recortadas pela área de estudo, os dados foram organizados em um ficheiro matricial com valor único e transformado numa malha, seguindo os mesmos procedimentos utilizados no MDE. As informações sobre o uso e cobertura da terra, serviram de base para o coeficiente de Manning e como suporte na análise dos resultados.

Na aplicação no IBER, o primeiro passo é importar a malha e definir parâmetros de entrada, lados máximos (100m) e mínimo (12,5m), que se referem à amplitude máxima (conforme terreno) e mínima (resolução espacial do modelo).

Após adicionada a malha, é necessário inserir valores de tempo de concentração – Tc (em segundos) e caudal – Qp (vazão) de ponta de inundação (m³/s). Na caixa de diálogo são informados os caudais máximos e tempo de concentração. Nessa etapa diferentes entradas de caudais podem ser inseridas, sendo necessário substituir sequencialmente o número na caixa “Inlet Num”, e as demais entradas (Inlet), Tc e Qp. Os dados utilizados seguiram a sequência de valores apresentados no quadro I. Após a indicação dos valores de entrada *Total Discharge sub* é informado o ponto de exutório (outlet) do modelo.

A seguinte etapa é destinada a informar os tempos de processamento, definidos em segundos. O tempo de processamento tem como base o tempo de concentração máximo *Max simulation* o qual foi 284 400 segundos (79 horas, tempo de concentração definido para o Alto Rio Taquari); *Results time interval* – 5000 segundos, valor definido pelo operador, em que quanto menor o intervalo, mais detalhados são os resultados que simulam o avanço da água sobre a planície de inundação.

Considerando a dimensão da bacia hidrográfica e da malha, o processamento demorou 44 horas. Os resultados podem ser visualizados diretamente no IBER, ou então exportados em *raster* e manipulados em outro sistema de informação Geográfica (SIG). Para este trabalho, optou-se por exportar os dados em modelo *raster* (*.geotiff) e realizar as análise e elaboração de mapas no *software Qgis* versão 3.28.

3. Validação do modelo

A validação dos resultados obtidos no modelo foi feita a partir dos registos de inundação para Estrela e Lajeado da CPRM com a indicação da altura da água de 27 metros e de Laipelt *et al.* (2023) que delimitaram as manchas de inundação em Estrela e Lajeado. Em Lajeado, os autores utilizaram um MDE construído com base em dados vetoriais na escala de 1:2000, para Estrela foi utilizado o método HAND, baseado em imagens de resolução espacial de três metros. Nas duas áreas, Borges *et al.* (2024) coletaram pontos de inundação em campo logo após um evento de inundação, com dados sobre ruas, bairros e série histórica de eventos e identificaram áreas de inundação com trabalho de campo em junho de 2023. Os procedimentos utilizados são similares aos apresentados por Bladé *et al.* (2014).

Os valores e planos de informação foram comparados e analisados. Todo o modelo computacional conta com uma taxa de erro, pois segundo Seibert *et al.* (2018), simular os processos naturais é uma tarefa complexa, pois não segue padrões simétricos, além disso, a generalização nos dados também pode inserir taxas de erro ao produto. Assim, a validação por meio de amostras coletadas em campo, possibilitam verificar, de uma maneira direta, a confiabilidade nas áreas indicadas como inundáveis.

Além da validação do modelo, realizaram-se análises, onde foram mensurados os tipos de uso e cobertura da terra localizados nas áreas urbanas dos dois municípios (Souza *et al.*, 2020), além das taxas de crescimento populacional baseadas nos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024) e inventário de eventos e danos causados, coletados no jornal regional *Zero Hora*. O número de edificações que podem ser atingidas foram qualificadas utilizando a edificação gerada por meio de inteligência artificial e disponibilizadas pelo IPH/UFRGS (Possantti *et al.*, 2023).

IV. RESULTADOS

O modelo hidráulico 2D, gerado no IBER, possibilitou definir as áreas sujeitas à inundação nas áreas urbanas de Estrela e Lajeado, indicando uma altura máxima da água de 27,18 metros, valor obtido diretamente no processamento, sem a necessidade de calibração para se aproximar ao valor estabelecido pela CPRM (2021). Além das áreas sob influência direta do rio Taquari-Antas, é possível destacar porções onde as inundações ocorrem associadas ao Rio Forqueta e arroios Engenho, Encantado e Saraquá, na margem direita e arroios Boa Vista e Estrela na margem esquerda.

Ao comparar o modelo hidráulico 2D gerado no IBER com os dados disponibilizados pelo IPH/UFRGS (Laipelt *et al.*, 2023) é possível verificar visualmente a sobreposição das áreas (fig. 4).

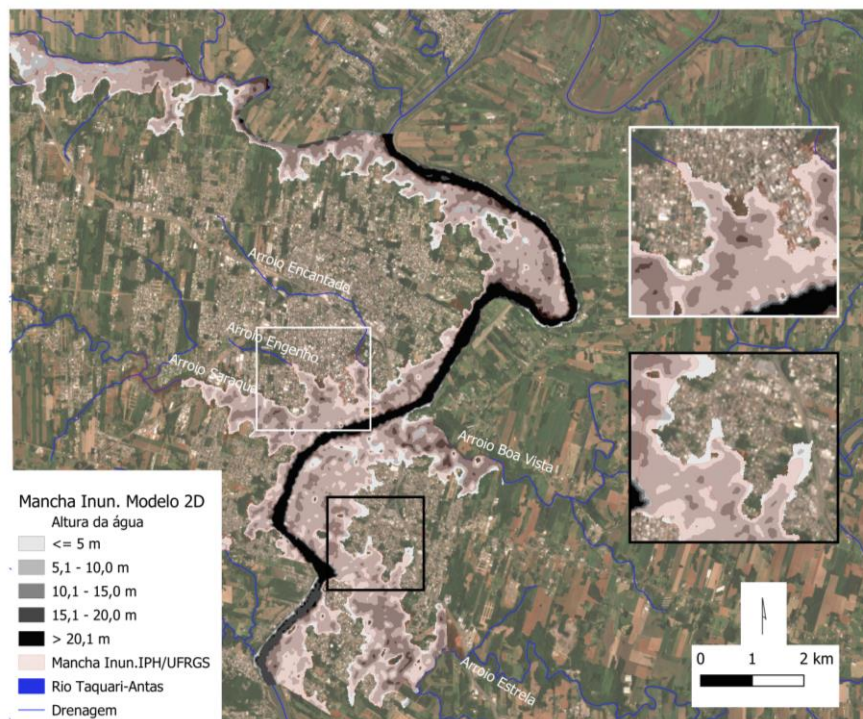


Fig. 4 – Áreas de inundação do modelo 2D do IBER e das áreas de inundação do relatório técnico do IPH/UFRGS 2023. Figura a cores disponível online.

Fig. 4 – Flooded areas from the IBER 2D model and the flooded areas from the IPH/UFRGS technical report. Colour figure available online.

No quadro II é possível verificar a área inundável obtida em cada modelo, além da sobreposição espacial entre os dois modelos. De uma forma geral, o modelo 2D do IBER apresenta áreas inundadas mais extensas que pode estar relacionada com a maior dimensão das células do MDE (12,5 m). No entanto, os dois modelos apresentam uma sobreposição espacial de 92,6% e 95,9% em Estrela e Lajeado, respectivamente. Estes resultados indicam que o modelo hidráulico 2D tem potencial de uso como uma alternativa metodológica e que o MDE provindo do Alos/Palsar, teve uma resposta satisfatória quando comparado as bases cartográficas de maior detalhe utilizadas por Seibert *et al.* (2018). As diferenças que existem, podem estar associadas às diferentes bases de dados, conforme descritas na metodologia, e ao processamento dos modelos (Lyu *et al.*, 2024, Silva Júnior *et al.*, 2022).

Quadro II – Áreas inundáveis (km²) indicadas pelos modelos hidráulicos em Estrela e Lajeado.

Table I – Flood areas (km²) indicated by hydrological models in Estrela and Lajeado.

Município	Modelo 2D IBER (km ²)	Modelo IPH/UFGS (km ²)	Sobreposição (km ²)
Lajeado	11,87	9,85	9,12
Estrela	9,10	8,00	7,67

Os dados de campo também validam os resultados do modelo, assim como nossas descrições das fontes documentais. Relativamente aos dados hidrológicos, no modelo foram utilizados dados de vazão para um período de retorno de 100 anos. A altura da água considerada para definição de áreas suscetíveis junto a área urbana dos municípios é de 27 metros, conforme definição da CPRM. Porém já existem registo de cotas excepcionais com valores superiores aos 27 metros, o que sugere a necessidade de recalcular os períodos de retorno para séries mais longas e mais recentes.

As inundações que ocorreram em setembro de 2023 e que atingiram as duas áreas urbanas, chegaram a uma altura máxima da água de 29,45 metros, conforme dados disponibilizados pela CPRM no jornal regional *Zero Hora*. A maior cheia registada em Lajeado ocorreu em 1941, quando a altura da água foi de 29,92 metros; outros episódios de destaque ocorreram em 1946, 1956 e 2020, informações registadas em uma régua no centro de Lajeado (fig. 5).

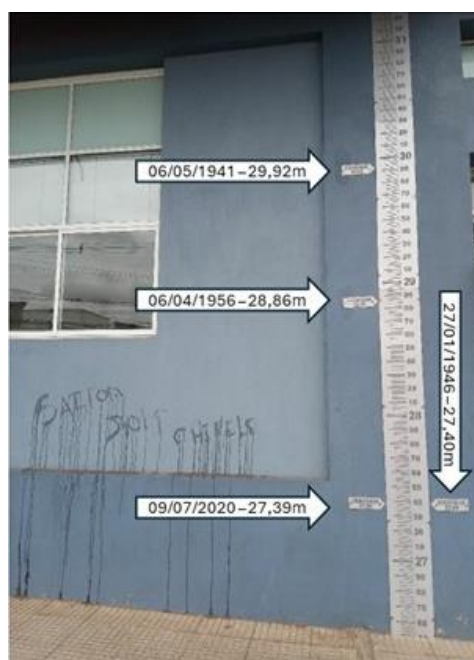


Fig. 5 – Régua de registo dos principais eventos de inundação localizada no centro de Lajeado. Figura a cores disponível online.

Fig. 5 – Register of the main flood events located in the centre of Lajeado. Colour figure available online.

Fonte: Scoti *et al.* (2024)

Com relação aos bairros atingidos por eventos hidrológicos, como indicado no modelo 2D do IBER, temos a seguinte distribuição: Lajeado – Imigrantes, Conventos, Igrejinha, Planalto, Campestre, Universitário, Carneiros, Hidráulica, Centro, Moinhos, Jardim do Cedro, Conservas, Santo Antônio, Morro 25 e Das Nações; Estrela – Boa União, São José, Das Indústrias, Moinhos, Oriental, Centro, Chacrinha, Cristo Rei, Auxiliadora, Imigrantes, Alto da Bronze e Estados (fig.1). Esse resultado corrobora com os trabalhos de Borges *et al.* (2024) e Eckhardt *et al.* (2009).

Na figura 6, podemos verificar que existe uma diversidade de usos e coberturas da terra na área indicada como inundável nas áreas urbanas de Estrela e Lajeado, não sendo em sua totalidade ocupados por áreas urbanizadas. Esse uso e ocupação do solo garante um lastro para que ações de mitigação e planejamento sejam aderidas ao processo de expansão urbana (Li *et al.*, 2022; Sobreira & Souza, 2012). Os resultados obtidos a partir da aplicação no IBER e obtenção do modelo hidráulico 2D possibilitam a gestão de áreas onde a ocupação com moradias ainda não é densa, evitando o avanço da expansão urbana sobre as planícies de inundação.

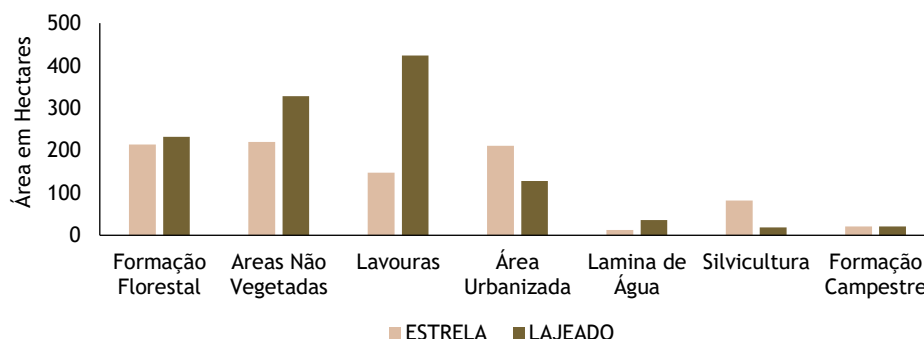


Fig. 6 – Área inundada (ha) do modelo IBER 2D por tipo de uso e cobertura nos municípios de Estrela e Lajeado. Figura a cores disponível online.

Fig. 6 – Flooded area (ha) of the 2D IBER model by type of use and cover in the municipalities of Estrela and Lajeado. Colour figure available online.

Fonte: Souza *et al.* (2020)

Comparando os dados populacionais dos dois municípios para os censos de 2000, 2010 e 2022 do IBGE, se verificou uma ampliação no número de habitantes (fig. 7). Isso se deve às características econômicas dos dois municípios, os quais possuem um desenvolvimento industrial que gera empregos e atrai pessoas de outras porções do estado (Rubin *et al.*, 2008). O aumento populacional tem fomentado o crescimento da urbanização, a qual nem sempre é feita de maneira planejada (Maricato, 1995).

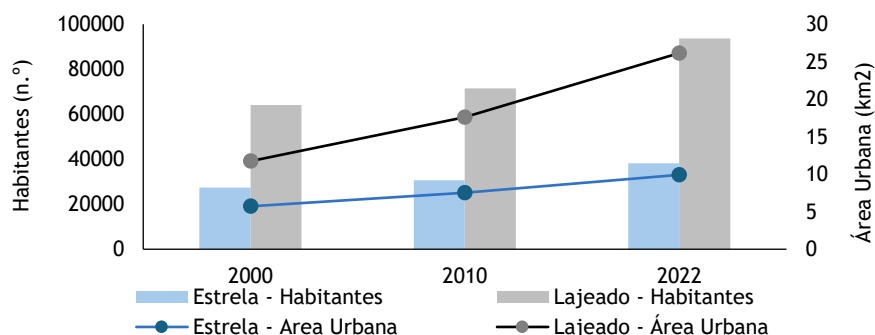


Fig. 7 – Área urbana e número de habitantes nos municípios de Estrela e Lajeado (2000, 2010 e 2022). Figura a cores disponível online.

Fig. 7 – Urban area and number of inhabitants in the municipalities of Estrela and Lajeado (2000, 2010 and 2022). Colour figure available online.

Fonte: Souza *et al.* (2020); IBGE (2024)

Com relação ao número de edificações inseridas nas áreas suscetíveis a eventos hidrológicos indicadas no modelo 2D do IBER, verificou-se que Lajeado possui 1958 e Estrela 3385 edificações expostas. Os valores encontrados para Lajeado estão bem próximos dos indicados por Possantti *et al.* (2023), que assinala 1917 edificações. Os números de edificações não são exatamente iguais, pois os dois modelos apresentam algumas áreas onde não ocorre a sobreposição. Para Estrela, os valores foram maiores, quando comparado aos autores citados, que quantificaram 2786 edificações. Para um refinamento das informações sobre as edificações é recomendado que se faça um trabalho cadastral de detalhe (Knierin, 2022).

Com base nos dados levantados em trabalho de campo e nos resultados apresentados por Borges *et al.* (2024), se verifica que além dos bairros mais atingidos também estão expostas algumas ruas e moradias específicas. Na figura 8A e 8B, é possível observar as áreas expostas a processos hidrológicos em Estrela (Rua São Roque e bairro Moinhos), porção que apresenta alta recorrência de inundações, tendo mais de 12 registros no período entre 2002 e 2022 (Borges *et al.*, 2024). No ponto de coleta das fotografias 8C e 8D, a profundidade obtida no modelo hidráulico 2D, foi de 2,77 metros, cujo valor corrobora os dados disponibilizados por Possantti *et al.* (2023). Nas imagens C e D, outra área de expansão urbana no bairro Imigrante, as inundações estão associadas à elevação no nível do Arroio Estrela.

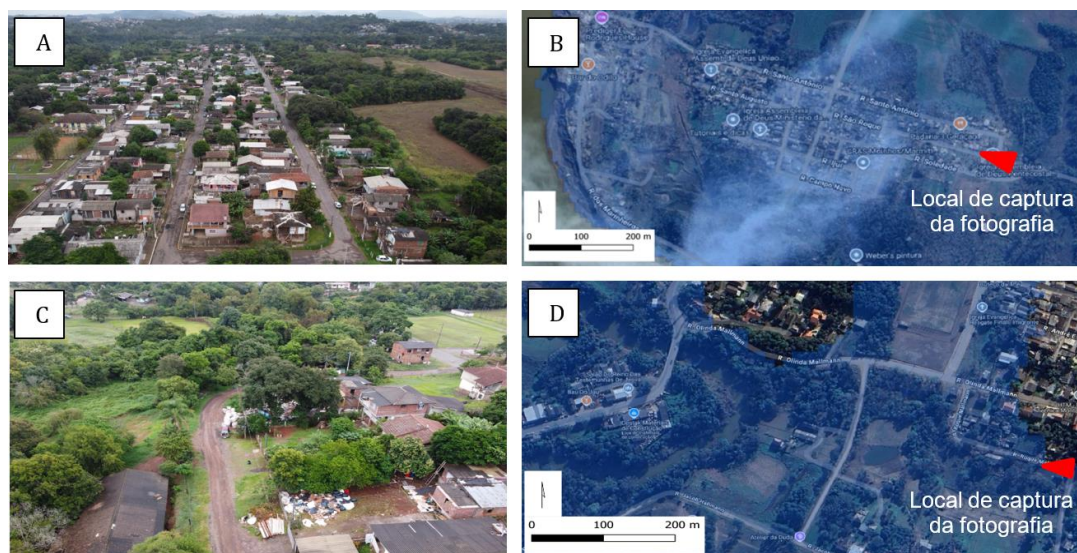


Fig. 8 – Áreas suscetíveis a inundação no município de Estrela. Panorâmica das moradias no bairro Moinhos (A), imagem satélite indicando o local de captura da fotografia (B), panorâmica das moradias no bairro Imigrantes (C) e imagem satélite indicando o ponto de coleta da fotografia e um dos limites de inundação registrados em campo (D).

Fig. 8 – Areas susceptible to flooding in the municipality of Estrela. Panoramic image of houses in the Moinhos neighborhood (A), satellite image indicating the place where the photograph was taken (B), panoramic image of houses in the Imigrantes neighborhood (C) and image indicating the point where the photograph was taken and one of the flood limits recorded in the field (D).

Em Lajeado, um dos bairros com maior recorrência é o Centro. Na área do parque dos Dick (fig. 9A e 9B), localizado próximo ao bairro Centro, os eventos hidrológicos registrados em setembro de 2023, porções de terra com edificações foram atingidas. Na figura 9C e 9D, observa-se a indicação de um limite de área inundável próximo ao cruzamento da rua Carlos Von Koseritz com a Avenida Décio Martins Costa, o qual é indicado pela seta.



Fig. 9 – Áreas suscetíveis a inundação no município de Lajeado. Parque dos Dick e rua Santo Filho (A), Imagem satélite indicando o ponto de captura da fotografia e características da ocupação ao redor do Parque (B), cruzamento da rua Carlos Von Koseritz com a Avenida Décio Martins Costa (C) e limite da inundação obtido 2D IBER (D). Figura a cores disponível online.

Fig. 9 – Flood susceptible areas in Lajeado municipality. Dick Park and Santo Filho street (A), Satellite image indicating the point of capture of the photograph and characteristics of the occupation around the Park (B), intersection of Carlos Von Koseritz Street and Décio Martins Costa Avenue (C) and flood boundary of the 2D IBER model (D). Colour figure available online.

V. DISCUSSÃO

A modelagem hidráulica possibilita a criação de cenários de áreas inundáveis, altura da água e velocidade dos fluxos. Simular o comportamento dos excedentes fluviais possibilita uma gestão mais adequada das áreas propensas à inundação. Em termos metodológicos e operacionais, os *softwares* de modelagem hidráulica servem de suporte ao planejamento e tomada de decisão por gestores e Defesa Civil (Fonseca *et al.*, 2018; Sañudo *et al.*, 2020)

O *software* IBER permite a obtenção de modelos matemáticos bidimensionais e simulação dos fluxos hídricos em cursos de água. Fonseca *et al.* (2018) descrevem a necessidade da avaliação preliminar das áreas com risco de inundação. Ao trabalhar com uma área montanhosa no norte de Portugal, os autores desenvolveram uma metodologia baseada no acoplamento do IBER com o *Hydrological Simulation Program - FORTRAN* (HSPF). Os autores obtiveram resultados promissores que foram validados com base em parâmetros estatísticos e dados coletados em estações fluviométricas, com a definição das áreas propensas à inundação para PR de dez, 50 e 100 anos (Fonseca *et al.*, 2018).

A modelagem hidráulica gerada no IBER permite o estudo de inundações geradas por cursos de água, como é caso do Taquari até aos processos de alagamentos ocasionados por drenagem urbana ineficiente. Sañudo *et al.* (2020) utilizaram o IBER (2D) ligado ao modelo 1D *Storm Water Management Model* (SWMM). Com o acoplamento dos dois modelos os autores simularam o comportamento dos fluxos superficiais e na rede de esgoto numa área urbana da Andaluzia (ES). A capacidade do modelo foi testada em três estudos em diferentes escalas. No primeiro foram testadas as capacidades básicas do modelo, no segundo compararam os dados experimentais em escala real e, por fim, o terceiro avaliou a capacidade do modelo simular alagamentos após eventos pluviais.

O modelo hidráulico gerado no IBER possibilita projetar a magnitude de eventos hidrológicos e, com isso, propor ações de mitigação e redução de danos. Os parâmetros de entrada necessários para gerar o modelo hidráulico são facilmente obtidos em plataformas de dados geográficos, como dados *AlosPalsar* e informações sobre uso e cobertura da terra e ainda, as informações fluviométricas podem ser consultadas em estações fluviométricas ou trabalhos acadêmicos. São poucos os pontos que demandam de uma atenção pormenorizada do usuário, sendo assim, é possível obter as áreas propensas à inundação, a altura da água e velocidade de escoamento com uma tecnologia de baixo custo (Moreira & Santos, 2020).

Sobre os dados de entrada e os custos computacionais, García-Alén *et al.* (2022) ao modelarem processos hidrológicos com base em equações de águas rasas, comentam que, muitas vezes, a resolução da malha computacional limita as operações. Utilizando o IBER, os autores modelaram sete eventos em quatro bacias hidrográficas tendo como base três diferentes modelos digitais de elevação. Concluíram que malhas construídas com um limite de até 25 metros e baseadas em dados LIDAR fornecem resultados semelhantes ao hidrograma de saída (*outlet*).

Com o IBER é possível modelar o comportamento da água. Como exemplo cita-se o trabalho de Camargo *et al.* (2012), onde foi feita uma análise do comportamento do escoamento superficial e a recarga de aquífero, em diferentes condições de pluviosidade. Os autores concluíram que os resultados obtidos com o IBER se aproximaram do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

Além dos estudos hidráulicos referentes à definição da suscetibilidade à inundação e bases para definir a perigosidade, o IBER possibilita analisar o transporte de sedimentos e simula a rutura de barragens. Em relação à rutura de estruturas, Quijano *et al.* (2018) utilizaram o modelo bidimensional do IBER para simular em laboratório o processo de rutura em barragens e calcular a soma das águas e o momento de rutura de barragens construídas no México.

Com a redução dos tempos de retorno de eventos extremos de precipitação e, consequentemente, de elevação de caudais, os modelos gerados no IBER representam uma importante ferramenta de auxílio na identificação das áreas e na quantificação da severidade dos eventos. No México, Garcia *et al.* (2022) utilizaram o IBER para definir as áreas de elevado risco de inundação com dados coletados após a passagem do furacão Matthew em outubro de 2010. Os autores definiram as áreas inundáveis e a altura da água, identificando 33 localidades afetadas (56,9%) classificadas como de alto risco. A validação do modelo ocorreu através de uma imagem *SPOT 4*, sobrepondo ao modelo dados coletados pelo satélite, indicando uma boa concordância dos resultados (Garcia *et al.*, 2022).

A validação dos modelos gerados no IBER é baseada em dados coletados em campo e/ou em eventos passados, os quais possibilitam a obtenção, em grau de detalhe, de informações que indiquem a confiança do modelo. Produtos de sensoriamento remoto, como as imagens do *Sentinel*, possibilitam

a sobreposição do modelo hidráulico sobre imagens de áreas inundáveis, quando disponíveis. Essas formas de validação são utilizadas e descritas por Fernández-Nóvoa *et al.* (2024).

A altura da água definida com o modelo 2D gerado no IBER para Estrela e Lajeado se aproximou dos registos históricos, mostrando um nível de acerto aceitável, de acordo com os processos de validação descritos por Bladé *et al.* (2014). Para áreas onde não existam dados topográficos de detalhe, as imagens do *Alos/Palsar* representam uma considerável alternativa, pois possibilitaram ao modelo se aproximar das condições mapeadas em campo (Vieira *et al.*, 2022). Quanto maior o nível de detalhe do MDE, mais próximo da realidade serão os resultados, porém, não são todas as áreas urbanas de municípios atingidos por inundações que dispõem de densas e detalhadas bases de dados. O uso das aeronaves remotamente pilotadas (ARPs), representam uma alternativa à coleta de dados de detalhe, os quais permitem uma maior aproximação do modelo à realidade e seu uso com maior confiabilidade, principalmente, em nível operacional (Yiran *et al.*, 2024).

Ao comparar o IBER com outros modelos é possível verificar que, além da fácil e democrática aplicação, os resultados gerados apresentam alto grau de satisfação. Pinos e Timbe (2019) compararam os modelos hidráulicos 2D gerados no HEC-RAS, IBER, *Flood Modeller* e PCSWMM utilizando como área de estudo uma região montanhosa nos Andes Equatoriais. Os autores concluíram que o IBER 2D tem o melhor desempenho na simulação do nível de água e área de inundação para eventos com PR de 20 e 50 anos, seguido pelo *Flood Modeller*, HEC-RAS e PCSWMM.

Os modelos hidráulicos possibilitam identificação das áreas inundáveis, altura da água, velocidade e elevação da água, dados essenciais para estudo e mitigação de eventos hidrológicos. Jha e Afreen (2020) desenvolveram um sistema que permite a previsão de inundações e análise da suscetibilidade utilizando o SWAT e o HEC-Ras numa bacia hidrográfica urbana do Blue River no Missouri. Os resultados se mostraram úteis e com potencial para ajudar na integração dos dados e avaliação do risco por meio da combinação dos modelos.

As definições de áreas inundáveis e a altura da água possibilita o estudo dos impactos gerados durante e após os eventos. O número de domicílios afetados, perdas em áreas agricultáveis e a exposição de pessoas são algumas das análises que são obtidas a partir dos cruzamentos de mapas, tendo como base no modelo hidráulico. Neste contexto, Leal *et al.* (2021), ao utilizar o HEC-GeoRAS, obteve parâmetros como a profundidade da água e velocidade do escoamento para o cálculo da intensidade das inundações, assim como parâmetros físicos dos edifícios expostos a inundações repentinas. No final, propõem um índice de vulnerabilidade física ao edifício, podendo ser ajustado e aplicado em diferentes áreas estudo.

Nos resultados do modelo 2D de Lajeado e Estrela, as áreas suscetíveis a inundação que ainda não forma ocupadas por moradias demandam atenção sob o ponto de vista do ordenamento do território, pois com o crescimento populacional, áreas ocupadas com florestas ou com lavouras, podem ser convertidas em novos condomínios ou ocupações irregulares, aumentando a área edificada exposta ao perigo de inundação. Ao usar álgebra de mapas, Schorn e Vieira (2023) diagnosticaram as formas de uso e ocupação do solo em áreas ambientalmente frágeis e suscetíveis à inundação no município de Indaial/SC/BR. Os autores concluíram que está ocorrendo uma ampliação da ocupação com moradias nas margens do rio Itajaí-Açu, ampliando o número de edificações e pessoas expostas aos eventos hidrológicos.

O avanço da urbanização sobre áreas suscetíveis à inundação é um processo recorrente, principalmente, em países em desenvolvimentos (Özer & Ercoşkun, 2024). Estrela e Lajeado configuram-se como cidades atrativas para migração, tanto interna como externa, pois possuem uma indústria de produtos alimentícios bastante consolidada (Campos & Silveira, 2014; Mejía & Cazarotto, 2017)

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os avanços no uso de técnicas para identificação e mapeamento de áreas sujeitas a processos hidrológicos vinculados às inundações, se reveste de grande importância, pois possibilita que o processo de cartografia dessas áreas, seja cada vez mais dinâmico e próximo a realidade. Mapear e analisar as áreas sujeitas a desastres naturais, abastece com informações os órgãos responsáveis pela tomada de decisão e, os atores que atuam na linha de frente durante os eventos.

O foco deste artigo foi verificar a aplicabilidade do modelo hidráulico 2D gerado a partir do IBER, para os estudos sobre as inundações que assolam, principalmente, as áreas urbanas dos

municípios do Rio Grande do Sul. Na área de estudo existem publicações com detalhe sobre a identificação das áreas suscetíveis e sua correlação com eventos e cotas em Estrela e Lajeado que serviram de apoio para determinar a aplicabilidade do modelo e, portanto, replicar o modelo em outras áreas com menor número de informações.

Considera-se que o objetivo proposto neste trabalho foi cumprido, permitindo a utilização de uma ferramenta voltada ao mapeamento e indicação de áreas suscetíveis à inundação. O procedimento utilizado para validar o modelo baseado em publicações existentes e trabalhos de campo demonstrou que para a escala utilizada os resultados foram satisfatórios. Os resultados apresentados neste artigo não devem ser utilizados em ações operacionais, mas sim no planejamento e estratégia. Com a obtenção de um MDE, com maior grau de detalhe, os resultados poderão ser utilizados para subsidiar ações operacionais em campo.

De acordo com os dados do Censo de 2022, os municípios de Estrela e Lajeado apresentaram crescimento populacional, o que gera pressão sobre o espaço urbano e sua consequente expansão para áreas perigosas. A obtenção e manipulação dos dados geoespaciais, em um ambiente georreferenciado do SIG pode ser uma valiosa ferramenta de planejamento e assim reduzir danos e perdas em episódios de inundação futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de Pós-Doutorado, por meio do Programa Institucional de Internacionalização – CAPES/PrInt.

CONTRIBUTOS DOS/AS AUTORES/AS

Anderson Augusto Volpato Scoti: Conceptualização; Metodologia; Software; Validação; Análise formal; Investigação; Curadoria dos dados; Escrita – preparação do esboço original; Redação – revisão e edição. **Carlos Valdir de Meneses Bateira:** Conceptualização; Metodologia; Software; Validação; Análise formal; Investigação, Redação – revisão e edição. **Luis Eduardo de Souza Robaina:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Análise formal; Investigação; Redação – revisão e edição. **Susana Pereira:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Análise formal; Investigação; Redação – revisão e edição. **Romario Trentin:** Conceptualização; Metodologia; Validação; Análise formal; Investigação; Redação – revisão e edição.

ORCID ID

Anderson Augusto Volpato Scoti  <https://orcid.org/0000-0001-8667-0432>
 Carlos Valdir de Meneses Bateira  <https://orcid.org/0000-0002-5039-6053>
 Luis Eduardo de Sousa Robaina  <https://orcid.org/0000-0002-2390-6417>
 Susana Pereira  <https://orcid.org/0000-0002-9674-0964>
 Romario Trentin  <https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcantara-Ayala, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4), 107-124. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1)
- Almeida, L., & Serra, J. C. V. (2017). Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas [Hydrological models, types and applications used more]. *Revista da FAE*, 20(1), 129-137. <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E. ... Coll, A. (2014). IBER: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos [IBER: numerical simulation tool for flow in rivers]. *Revista Internacional de Métodos Numéricos Para Cálculo y Diseño En Ingeniería*, 30(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>

- Bladé, E., Gómez-Valentín, M., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. (2008). Preserving Steady-State in One-Dimensional Finite-Volume Computations of River Flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1343-1347. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1343\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1343))
- Borges, C. M. C., Robaina, L. E. S., & Scoti, A. A. V. (2024). Estudo dos processos hidrológicos causadores de desastres que ocorrem nos municípios de Estrela e Lajeado, Vale do Taquari/RS [Study of the hydrological processes that cause disasters that occur in the municipalities of Estrela and Lajeado, Vale do Taquari/RS]. *Revista Geografia Ensino & Pesquisa*, 28, 1-19. <https://doi.org/10.5902/2236499483744>
- Brito, M. M., & Evers, M. (2016). Multi-criteria decision-making for flood risk management: a survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(4), 1019-1033. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1019-2016>
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). A review of flood modeling methods for urban pluvial flood application. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(3), 1293-1302. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00803-z>
- Burmester, C. L. (2004). *Uso do perfilador a laser na estimativa da rugosidade em planícies de inundação* [Use of laser profilers to estimate roughness in flood plains]. [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná]. Repositório da Universidade Federal do Paraná. <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/3131>
- Camargo, C. A. C., Bladé, E., & Acosta, P. M. (2012). Modelo transferencia vertical dentro de un modelo hidrológico continuo en un esquema de volúmenes finitos [Vertical transfer model within a continuous hydrologic model in a finite volume scheme]. *L'esprit Ingénieux*, 3(1), 144-154. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/131/107>
- Campos, H. A., & Silveira, R. L. L. (2014). *Valorização do solo e reestruturação urbana: os novos produtos imobiliários na Região dos Vales - RS* [Land appreciation and urban restructuring: the new real estate products in the Vales Region - RS]. EDUNISC.
- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. (2021). *Portal Geosgb* [Geosgb portal]. CPRM. <https://geosgb.sgb.gov.br/>
- Dimitriadis, P., Tegos, A., Oikonomou, A., Pagana, V., Koukouvinos, A., Mamassis, N. ... Efstratiadis, A. (2016). Comparative evaluation of 1D and quasi-2D hydraulic models based on benchmark and real-world applications for uncertainty assessment in flood mapping. *Journal of Hydrology*, 534, 478-492. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.020>
- Eckhardt, R. R., Saldanha, D. L., & Rocha, R. S. (2009). Modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas urbanas sujeitas às inundações na cidade de Lajeado/RS [Cartographic model applied to mapping the urban areas reached by floods in the Lajeado city / RS]. *Revista Brasileira de Cartografia*, 60(3), 253-262. <https://doi.org/10.14393/rbcv60n3-44868>
- Fernández-Nóvoa, D., Ramos, A. M., González-Cao, J., García-Feal, O., Catita, C., Gómez-Gesteira, M., & Trigo, R. M. (2024). How to mitigate flood events similar to the 1979 catastrophic floods in the lower Tagus. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(2), 609-630. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-609-2024>
- Fonseca, A. R., Santos, M., & Santos, J. A. (2018). Hydrological and flood hazard assessment using a coupled modelling approach for a mountainous catchment in Portugal. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(7), 2165-2177. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1525-1>
- Garcia, J. V. G., Panta, J. E. R., Reynoso, D. S. F., Ayala, C. R., Hidalgo, R. R., García, F. G. G., & Sánchez, M. E. R. (2022). Modelación hidráulica en Iber para prevención de inundaciones en la cuenca Tesechoacán [Hydraulic modelling in Iber for flood prevention in the Tesechoacán river basin]. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 13(71), 1-23. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v13i71.1238>
- García-Alén, G., Gonzáles-Cao, J., Fernández-Nóvoa, D., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., & Puertas, J. (2022). Analysis of two sources of variability of basin outflow hydrographs computed with the 2D shallow water model Iber: Digital Terrain Model and unstructured mesh size. *Journal of Hydrology*, 612(Parte B), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128182>
- García-Feal, O., González-Cao, J., Gómez-Gesteira, M., Cea, L., Domínguez, J. M., & Formella, A. (2018). *An Accelerated Tool for Flood Modelling Based on IBER*. *Water*, 10(10), 1-23. <https://doi.org/10.3390/w10101459>
- Grotzinger, J., & Jordan, T. H. (2013). *Para Entender a Terra* [Understanding the Earth]. Bookman.
- Guasselli, L. A., Oliveira, G. G., Quevedo, R. P., & Brubacher, J. P. (2016). Modelagem hidrológica e espacialização de áreas suscetíveis às inundações no município de Igrejinha, RS [Hydrological modeling and

- spatialization of susceptible areas to flooding in the Igrejinha city, RS]. *Geo UERJ*, 28, 1-28. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2016.10984>
- Gumbel, E. J. (1941). The Return Period of Flood Flows. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12(2), 163-190. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177731747>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). *Cidades e Estados do Brasil* [Cities and States of Brasil]. IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- Istomina, M. N., & Dobrovoski, S. G. (2016). Floods of the world: quantitative analysis of natural characteristics and parameters of social-economic damages. *Water Resources*, 43(3), 459-471. <https://doi.org/10.1134/S0097807816030076>
- Jha, M. K., & Afreen, S. (2020). Flooding Urban Landscapes: analysis using combined hydrodynamic and hydrologic modeling approaches. *Water*, 12(7), 1986. <https://doi.org/10.3390/w12071986>
- Kandilioti, G., & Makropoulos, C. (2012). Preliminary flood risk assessment: the case of Athens. *Natural Hazards*, 61(2), 441-468. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9930-5>
- Knierin, I. S. (2022). Proposta metodológica para o estudo integrativo do risco de inundações: uma aplicação nos municípios de Taquara e Parobé, RS/Brasil [Methodological proposal for the integrative study of flood risk: an application in the municipalities of Taquara and Parobé, RS/Brazil]. [Tese de doutoramento, Universidade Federal de Santa Maria]. Repositório da Universidade Federal de Santa Maria. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFSM_a59af0b457579ee36f7e21b4c27bd8da
- Laipelt, L., Paiva, R., Fan, F., Ruhoff, A., Collischonn, W., Moraes, S. R., & Eckhardt, R. (2023). *Estimativa preliminar das áreas urbanas inundadas durante a cheia do Rio Taquari-Antas (Set-2023) via sensoriamento remoto* [Preliminary estimate of urban areas flooded during the Taquari-Antas River flood (Sept-2023) via remote sensing]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://www.ufrgs.br/hge/wp-content/uploads/2023/09/Nota-Tecnica-Cheia-Taquari-Antas-Set-2023.pdf>
- Leal, M., Reis, E., Pereira, S., & Santos, P. (2021). Physical vulnerability assessment to flash floods using an indicator-based methodology based on building properties and flow parameters. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12712. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12712>
- Li, G., Zhao, H., Liu, C., Wang, J., & Yang, F. (2022). City Flood Disaster Scenario Simulation Based on 1D-2D Coupled Rain-Flood Model. *Water*, 14(21), 3548. <https://doi.org/10.3390/w14213548>
- Luu, C., Meding, J., & Kanjanabootra, S. (2018). Flood risk management activities in Vietnam: a study of local practice in Quang Nam province. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 776-787. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.02.006>
- Luz, R. A., & Rodrigues, C. (2020). O processo histórico de ocupação e de ocorrência de enchentes na planície fluvial do rio Pinheiros de 1930 até os dias atuais [The historical process of occupation and the occurrence of floods in the Pinheiros river plain from 1930 to the present day]. *GEOUSP Espaço e Tempo*, 24(2), 340-360. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2020.164499>
- Lyu, H., Moravati, K., Zhang, K., & Tian, F. (2024). Hydrological model calibration in data-deficient basins using satellite altimetry and a hydrodynamic model. *Journal of Hydrology*, 643(1), 132022. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132022>
- Maricato, E. (1995). *Metrópole na periferia do capitalismo: ilegalidade, desigualdade e violência* [Metropolis on the periphery of capitalism: illegality, inequality and violence]. Hucitec.
- Martínez-Cantó, R., & Hidalgo, A. (2016). Modelización de inundaciones fluviales con IBER: caso práctico de Santiago del Molinillo (León) [Modeling of fluvial floods with IBER: case study of Santiago del Molinillo (León)]. *Topografía y Cartografía: Revista Del Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos En Topografía*, 34(172), 7-12. <https://www.coigt.com/publicaciones>
- Martins, E. S. P. R., & Clarke, R. T. (1993). Likelihood-based confidence intervals for estimating floods with given return periods. *Journal of Hydrology*, 147(1-4), 61-81. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90075-K](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90075-K)
- Martins, M., Gonçalves, P., Gomes, A., & Teixeira, J. (2020). Definition of Flood-Prone Areas: a comparison between HEC-RAS and Iber Software Results. In F. Fernandes, A. Malheiro & H. I. Chaminé (Eds.), *Advances in Natural Hazards and Hydrological Risks: meeting the Challenge* (pp. 127-131). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34397-2_25
- Mejía, M. R. G., & Cazarotto, R. T. (2017). O papel das mulheres imigrantes na família transnacional que mobiliza a migração haitiana no Brasil [The role of immigrant women in the transnational family which mobilizes haitian migration in Brazil]. *Revista Pós Ciências Sociais*, 14(7), 171-190. <https://periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/rpcsoc/article/view/6452>

- Menezes, D. J., Robaina, L. E. S., & Trentin, R. (2020). Estudo das inundações na cidade de Alegrete, Rio Grande do Sul: probabilidade e espacialização do perigo [Flood study in the Alegrete city, Rio Grande do Sul: probability and spacialization of the hazard]. *Caminhos de Geografia*, 21(74), 213-225. <https://doi.org/10.14393/RCG217450113>
- METSUL Meteorologia. (2024, maio). *Vale do Taquari: uma região arrasada que parece ter sido bombardeada* [Vale do Taquari: a devastated region that appears to have been bombed]. METSUL Metereologia. <https://metsul.com/vale-do-taquari-uma-regiao-arrasada-que-parece-ter-sido-bombardeada/>
- Moreira, R. M., & Santos, C. O. (2020). Flood risk assessment and management for urban areas in Brazilian Pantanal using free and open source GIS software. *International Journal of Risk Assessment and Management*, 23(2), 191. <https://doi.org/10.1504/IJRAM.2020.106982>
- Oliveira, G. G., Eckhardt, R. R., Haetinger, C., & Alves, A. (2018). Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas [Spatial characterization of susceptible areas to floods and flash floods in the Taquari-Antas river basin]. *Geociências*, 37(4), 849-863. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i4.12312>
- Özer, B. & Ercoşkun, Ö. (2024). Assessing the Impact of Urbanization on Flood Risk by RS and GIS: a case study on Istanbul-Esenyurt. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 8(1), 57-78. <http://doi.org/10.25034/ijcua.2024.v8n1-4>
- Portal de Notícias G1. (2024, junho). *Enchentes no RS: defesa Civil confirma mais uma morte e total chega a 179; 34 seguem desaparecidos* [Floods in RS: Civil Defense Confirms One More Death, Bringing the Total to 179; 34 Remain Missing]. Portal de Notícias G1. <https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/06/09/enchentes-no-rs-total-de-mortos-sobe-para-173-e-de-desaparecidos-cai-para-38.ghtml>
- Possantti, I., Marques, G. F., & Paiva, R. (2023). *O impacto em edificações causado pela cheia do Rio Taquari-Antas de 4 e 5 de setembro de 2023: estimativa preliminar e diretrizes para ações de adaptação e resposta* [The impact on buildings caused by the flooding of the Taquari-Antas River on September 4 and 5, 2023: preliminary estimate and guidelines for adaptation and response actions]. IPH/UFRGS. <https://www.ufrgs.br/warp/2023/09/19/nota-tecnica-o-impacto-em-edificacoes/>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11-18. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.03.001>
- Prina, B. Z., & Trentin, R. (2018). Tempo de retorno de inundações: aplicação metodológica [Flood return time: methodological application]. *GEOUSP Espaço e Tempo*, 22(3), 670-686. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2018.145266>
- Quijano, M. Á. S., González, C. M., & Gutiérrez-López, A. (2018). Modelación hidrológica de la rotura de presa utilizando el software IBER [Hydrological modeling of dam breakage using IBER software]. *Revista NTHE*, 24, 34-40. <https://nthe.mx/detallesrev.php?id=25>
- Ramos, P. A. S., Oliveira, G. G., Brito, M. M., & Filho, L. C. P. S. (2018). Proposta Metodológica para o Mapeamento da Vulnerabilidade a Inundações [Methodological Proposal for Flood Vulnerability Mapping]. *Anuário Do Instituto de Geociências*, 41(3), 281-291. https://doi.org/10.11137/2018_3_281_291
- Reckziegel, B. W. (2007). *Levantamento dos desastres desencadeados por eventos naturais adversos no estado do Rio Grande do Sul no período de 1980 a 2005* [Survey of disasters triggered by adverse natural events in the state of Rio Grande do Sul from 1980 to 2005]. [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria]. Repositório da Universidade Federal de Santa Maria. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFSM_62dcbddc53875330e327de59e65a8bd2
- Robaina, L. E. S., & Trentin, R. (2013). *Desastres Naturais no Rio Grande do Sul* [Natural Disasters in Rio Grande do Sul]. UFSM.
- Rossato, M. S. (2011). Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia [The climates of Rio Grande do Sul: variability, trends and typology]. [Tese de doutoramento, Universidade Federal do Rio Grande do Sul]. LUME. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/32620>
- Rubin, L. S., Hernades, J., Dill, M., Oliveira, S. M., & Alves, T. N. (2008). Desenvolvimento regional e a caracterização do aglomerado suinícola da região Vale do Taquari – RS [Regional development and the characterization of the pig agglomeration in the Vale do Taquari region – RS]. *Revista De Administração, Contabilidade e Economia*, 7(2), 167-186. <https://periodicos.unoesc.edu.br/race/article/view/366>

- Santos, P. P., Reis, E., Pereira, S., & Santos, M. (2019). A flood susceptibility model at the national scale based on multicriteria analysis. *Science of The Total Environment*, 667, 325-337. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.328>
- Sañudo, E., Cea, L., Puertas, J. (2020). Modelling Pluvial Flooding in Urban Areas Coupling the Models Iber and SWMM. *Water*, 12(9), 1-15. <https://doi.org/10.3390/w12092647>
- Saueressig, S. R., & Robaina, L. E. S. (2015). Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaquí - RS [Zoning of flood risk areas in the urban area of Itaquí - RS]. *Boletim Gaúcho de Geografia*, 42(2), 672-687. <https://seer.ufrgs.br/index.php/bgg/article/view/41397>
- Sausen, T., & Narvaes, I. (2015). Sensoriamento Remoto para Inundação e Enxurrada [Remote Sensing for Flooding and Flash Floods]. In T. M. Sausen & M. S. P. Lacruz (Eds.), *Sensoriamento Remoto Para Desastres* [Remote Sensing for Disasters] (pp. 118-147). Oficina de Textos.
- Secretaria do Meio Ambiente do estado do Rio Grande do Sul. (2011). *Plano de Bacia Taquari-Antas*. [Taquari-Antas watershed management plan]. SEMA. <https://sema.rs.gov.br/g040-bh-taquari-antas>
- Seibert, J., Vis, M. J. P., Lewis, E., & Meerveld, H. J. (2018). Upper and lower benchmarks in hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 32(8), 1120-1125. <https://doi.org/10.1002/hyp.11476>
- Silva Júnior, A. J., Silva Júnior, U. J., Pacheco, A. P., & Santos, A. G. A. (2022). Análise de acurácia altimétrica para dados ALOS PALSAR e ASTER GDEM para o município do Recife-PE [Altimetric accuracy analysis for ALOS PALSAR and ASTER GDEM data for the municipality of Recife-PE]. *Revista Brasileira de Geomática*, 10(2), 117-139. <https://doi.org/10.3895/rbgeo.v10n2.14969>
- Schorn, F. A., & Vieira, R. (2023). Análises sobre a ocupação do solo em áreas urbanas de preservação permanentes e suscetíveis à inundação: estudo de caso no Vale do Itajaí, SC [Analysis of land occupation in urban areas of permanent preservation and susceptible to flooding: a case study in the Itajaí Valley, SC]. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 15, e20220110 <https://doi.org/10.1590/2175-3369.015.e20220110>
- Sobreira, F. G., & Souza, L. A. (2012). Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano [Geotechnical cartography applied to urban planning]. *Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 2(1), 79-97. <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/8321>
- Souza, C. M. Z., Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L. A., Alencar, A., Rudorff, B. F. T. ... Azevedo, T. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Teló, F., & David, C. (2012). O rural depois do êxodo: as implicações do despovoamento dos campos no distrito de Arroio do Só, município de Santa Maria/RS, Brasil [The countryside after the exodus: the implications of the depopulation of the fields in the district of Arroio do Só, municipality of Santa Maria/RS, Brazil]. *Mundo Agrário*, 13(25). <https://www.mundoagrario.unlp.edu.ar/article/view/MAv13n25a05>
- Trentin, R., Robaina, L. E. S., & Laurent, F. (2021). Definição das unidades de resposta hidrológica na bacia hidrográfica do rio Santa Maria - RS [Definition of hydrological response units in the hydrographic basin of rio Santa Maria - RS]. *Caminhos de Geografia*, 22(84), 269-284. <https://doi.org/10.14393/RCG228457131>
- Tuyls, D. M., Thorndahl, S., & Rasmussen, M. R. (2018). Return period assessment of urban pluvial floods through modelling of rainfall-flood response. *Journal of Hydroinformatics*, 20(4), 829-845. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.133>
- Vieira, M. R. S., Vinagre, M. V. A., Lobo, M. A. A., Lima, A. C. M., & Ponte, M. J. M. (2022). Mapeamento de áreas de risco a inundações com imagens ALOS PALSAR: estudo de caso em Belém (PA) [Mapping of flood risk areas with alos palsar images: a case study in Belém (PA)]. *Acta Geográfica*, 16(40), 47-63. <https://revista.ufrr.br/actageo/article/view/6749>
- Yiran, G. A. B., Kwang, C., & Blagogie, L. (2024). Optimizing flood risk modelling with high-resolution remote sensing data and analytic hierarchy process. *SN Social Sciences*, 4, 111. <https://doi.org/10.1007/s43545-024-00909-6>
- Zero Hora (2023). *Cheia do Taquari é a segunda maior da história do rio* [Taquari flood is the second highest in the river's history]. GZH. <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2023/09/cheia-do-taquari-e-a-segunda-maior-da-historia-do-rio-clm8djpik001o01368th6mxwh.html>