

RETROMODELAGEM DO EVENTO EXTREMO DE INUNDAÇÃO DO RIO TAQUARI NO HEC-RAS, OCORRIDO EM 09 DE JULHO DE 2020, NO MUNICÍPIO DE LAJEADO / RS

Sofia Royer Moraes

Engenheira Ambiental – UNIVATES; Mestre em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento – UFRGS
Doutoranda em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – IPH/UFRGS
E-mail: sofiaroyermoraes@gmail.com

Walter Collischonn

Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Professor titular de Hidrologia nos cursos de Engenharia Ambiental e Engenharia Hídrica
E-mail: collischonn@iph.ufrgs.br

Rafael Rodrigo Eckhardt

Mestre em Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto – UFRGS
Professor dos cursos de graduação em Medicina, Ciências Biológicas e Engenharia Ambiental – UNIVATES
E-mail: rafare@univates.br

Benício Emanuel Omena Monte

Doutor em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – UFRGS
Analista Pleno na empresa RHAMA Consultoria LTDA
E-mail: benicio_monte@hotmail.com

RESUMO

Em 09 de julho de 2020 ocorreu uma inundação no rio Taquari-Antas, classificada como de magnitude extrema e categorizada até o primeiro semestre de 2023, como sendo a maior inundação registrada nos municípios de Muçum, Encantado e Roca Sales e a quinta maior inundação registrada na série histórica dos municípios de Lajeado e Estrela, cidades localizadas no Vale do Taquari, Rio Grande do Sul. A inundação registrada em 05 de setembro de 2023 na bacia Taquari-Antas, com mais de 50 mortes, diversas cidades destruídas, prejuízos bilionários e com ampla repercussão nacional e a inundação de 19 de novembro de 2023, representaram eventos de inundação com magnitudes ainda maiores e serão alvos de publicações subsequentes, não estando contemplado no presente estudo. O objetivo do trabalho foi caracterizar o referido evento de inundação ocorrido em 09 de julho de 2020, realizar a retromodelagem hidrodinâmica e a simulação da mancha de inundação durante o nível máximo em Lajeado. As informações da precipitação foram sistematizadas de 25 estações pluviométricas do portal do Hidroweb, enquanto as informações sobre vazão foram coletadas das estações fluviométricas localizadas em Muçum e Encantado. A modelagem foi organizada no HEC-RAS no modelo 1D, considerando o regime de escoamento permanente. Os resultados indicaram que o evento de inundação foi precedido por 337,3 mm de precipitação média acumulada em 240 horas, 210,4 mm nas 72 horas anteriores e 116,5 mm no dia anterior da inundação. As chuvas registradas na bacia hidrográfica resultaram em uma vazão estimada de 14.938,54 m³/s em Encantado e de uma vazão modelada de 18.100,00 m³/s em Lajeado. Em Encantado, o nível do rio Taquari subiu 18,77 m, inundando os terrenos até a cota de 48,04 m, enquanto em Lajeado, o rio subiu 14,39 m, sendo aferida a cota de inundação de 27,39 m pelo sistema de monitoramento SACE. Os resultados da simulação da mancha de inundação em Lajeado foram satisfatórios e fidedignos com os pontos de validação marcados em campo com GPS durante o nível mais alto da inundação.

PALAVRAS CHAVE: Enchentes; Taquari-Antas; Modelagem Hidrodinâmica; Simulações;

RETROMODELLING OF THE EXTREME FLOOD EVENT OF THE TAQUARI RIVER IN HEC-RAS, WHICH OCCURRED ON 9 JULY 2020, IN THE MUNICIPALITY OF LAJEADO / RS

ABSTRACT

On July 9, 2020 there was a flood on the Taquari-Antas River, classified as extreme in magnitude and categorized until the first half of 2023, as the largest flood recorded in the municipalities of Muçum, Encantado and Roca Sales and the fifth largest flood recorded in the historical series of the municipalities of Lajeado and Estrela, cities located in the Vale do Taquari Rio Grande do Sul. The flood recorded on September 5, 2023 in the Taquari-Antas basin, with more than 50 deaths, several cities destroyed, billions in damages and with wide national repercussions, and the flood of November 19, 2023, represented flood events with even greater magnitudes and will be the subject of subsequent publications, not covered in this study. The aim of this work was to characterize the flood event that occurred on July 9, 2020, carry out hydrodynamic retromodelling and simulate the flood spot during the maximum level in Lajeado. Rainfall information was systematized from 25 rain gauge stations on the Hidroweb portal, while flow information was collected from the river gauge stations located in Muçum and Encantado. The modeling was organized in HEC-RAS in the 1D model, considering the permanent flow regime. The results indicated that the flood event was preceded by 337.3 mm of average rainfall accumulated over 240 hours, 210.4 mm in the 72 hours prior and 116.5 mm the day before the flood. The rainfall recorded in the catchment resulted in an estimated flow of 14,938.54 m³/s at Encantado and a modeled flow of 18,100.00 m³/s at Lajeado. In Encantado, the level of the Taquari River rose by 18.77 m, flooding the land up to a level of 48.04 m, while in Lajeado, the river rose by 14.39 m, with a flood level of 27.39 m measured by the SACE monitoring system. The results of the simulation of the flood spot in Lajeado were satisfactory and reliable with the validation points marked in the field with GPS during the highest flood level.

105

KEYWORDS: Floods, Taquari-Antas; Hydrodynamic Modeling; Simulations;

INTRODUÇÃO

A história do planeta Terra é longa e complexa, repleta de transformações capazes de evidenciar uma sucessão de estados de equilíbrio e de não-equilíbrio ao longo do tempo, que resultam em diferentes paisagens. A paisagem é a expressão dos processos compostos por uma sequência de mudanças que ocorreram e ainda ocorrem, desencadeadas pela ação de agentes naturais em um passado distante e por agentes naturais e humanos no presente. Quando essa transformação se manifesta no tempo e no espaço, reconhecida pela simples observação ou pelo conhecimento científico, chamamos o fato de **fenômeno**. Desta forma, erosão, enchente, inundação, desertificação e arenização são fenômenos, ora resultantes exclusivamente pelos agentes naturais, ora acelerados ou induzidos pelas ações humanas. Cada um desses fenômenos citados pode ser descrito pelo seu próprio processo a cada estado que se identifica nesse processo, sendo chamado de **evento**. Eventos não ocorrem na mesma velocidade, mas podem ocorrer no mesmo espaço. Assim sendo, por essa

combinação infinita, que a paisagem que vemos hoje é um retrato dos acontecimentos do passado e, sem dúvida, não será a mesma no futuro (Santos, 2007).

A dinâmica da paisagem também interfere e condiciona o comportamento das variáveis hidrológicas e o próprio ciclo hidrológico, como a precipitação pluviométrica, o comportamento dos processos de infiltração e de escoamento da água, os processos de erosão, transporte e sedimentação, a propagação das vazões e o comportamento das enchentes e das inundações em termos de frequência e magnitude (Lambin; Meyfroidt, 2010; Ervin; Hartter, 2020). Desde os primórdios da humanidade, a possibilidade dos rios serem utilizados como fonte de água para o consumo humano e para a agricultura, vias de transporte de cargas e fonte de energia e lazer, estimulou a instalação de assentamentos humanos ribeirinhos, os quais, de forma periódica, recebiam os benefícios das enchentes e sofriam com os transtornos das inundações (Eckhardt, 2008).

Segundo a Defesa Civil, as **enchentes** consistem no aumento da vazão ou descarga de um curso de água por certo período de tempo, em períodos de alta precipitação pluviométrica, que reflete na variação do nível da água ao longo do canal principal (leito menor), sem ocorrer transbordamento (Figura 1). Por sua vez, o termo **inundações** é utilizado quando as vazões de um curso de água superam a capacidade de descarga do canal principal e o excesso do volume de água que não consegue ser drenado extravasa para as áreas marginais habitualmente não ocupadas pelas águas, inundando as áreas ribeirinhas (leito maior ou planície de inundação), de acordo com a topografia e que abrigam vias de circulação e transporte, parques, áreas residenciais, recreativas, comerciais e industriais (Tucci; Bertoni, 2003). Segundo Tucci *et al.* (1995), os rios saem do seu leito menor e ocupam o leito maior dentro de um processo natural, em média, a cada dois anos, causando inundações. Assim, as inundações são consideradas uma consequência das enchentes (Oliveira, 2010).

Figura 1 - Representação da diferença entre enchentes, inundações e alagamentos



Fonte: CPRM, 2017.

A instalação e consolidação de aglomerados urbanos nas áreas próximas aos cursos de água, onde os gestores públicos geralmente permitem a realização de cortes, aterros e outras intervenções urbanísticas, além da invasão dessas áreas sem permissão com a finalidade habitacional, interfere na dinâmica das inundações e nas consequências das mesmas. A pressão imobiliária e o descaso público favorecem a ocupação residencial das áreas suscetíveis às inundações e também das áreas suscetíveis aos deslizamentos, ultrapassando os limites das condições naturais do meio e gerando áreas vulneráveis do ponto de vista social, econômico e ambiental. Quando ocorre um evento adverso de alta magnitude sobre uma área de alta vulnerabilidade, muito provavelmente estaremos diante de uma situação de desastre e de calamidade pública. **Desastres** são resultado de um ou mais eventos adversos sobre um espaço vulnerável, que podem ser de origem natural ou induzidos pelo homem, geralmente repentinos, que ocasionam danos humanos, materiais e/ou ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais (Santos, 2007; Castro, 1998).

A *United Nations International Strategy for Disaster Reduction* (UNISDR, 2009) considera desastre como uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou de uma sociedade envolvendo perdas humanas, materiais, econômicas ou ambientais de grande extensão, cujos impactos excedem a capacidade da comunidade ou da sociedade afetada de arcar com seus próprios recursos. Tobin e Montz (1997) e Marcelino (2008) complementam de que **desastres naturais** são definidos como o resultado do impacto de fenômenos naturais extremos ou intensos sobre um sistema social, causando sérios danos e prejuízos que excede a capacidade da comunidade ou sociedade atingida em conviver com o impacto.

De acordo com o relatório sobre *O Custo Humano dos Desastres Relacionados ao Clima entre 1995-2015* (UNISDR, 2016), as inundações foram o fenômeno natural mais comum do planeta, representando 47% do total de desastres naturais, afetando 2,3 bilhões de pessoas no mundo. Uma estimativa publicada pela UNISDR (2020), calcula que US\$ 651 bilhões (USD) foram perdidos em danos causados por inundações no mundo de 2000 a 2019. Estudo publicado por Nunes (2015), que analisou e categorizou os desastres naturais registrados na América do Sul entre 1960 e 2009, a partir dos dados disponíveis na plataforma EM-DAT, também indicou que a ocorrência de inundações é a tipologia de desastre mais comum na América do Sul. No Brasil, os desastres naturais estão relacionados aos fenômenos climáticos, potencializados pela ação humana, sendo as inundações, a seca, a erosão e os deslizamentos de terra os desastres mais comuns, responsáveis por um número elevado de perdas humanas e materiais todos os anos.

A ocorrência frequente de inundações no Brasil provoca impactos como perdas humanas e de bens materiais (Tominaga *et al.*, 2009). Do total de 31.909 desastres naturais registrados entre 1991 e 2010 no país, as inundações e enxurradas corresponderam a 33% do total. Esses eventos resultaram em 1.567 óbitos, 309.529 lesionados ou doentes, 1.812 desaparecidos e 3,5 milhões de pessoas impactadas (CEPED, 2012). De acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), em 2021, foram registrados mais de 22 mil eventos relacionados a desastres naturais em todo o país, com as inundações sendo a segunda causa mais comum, atrás apenas das enxurradas, que também tem vinculação com as variáveis meteorológicas, hidrológicas e relacionadas com a ocupação das áreas de risco geológico e geotécnico.

No Brasil, as enchentes e as inundações ocorrem com frequência em várias regiões do país. Os municípios mais atingidos estão localizados nas regiões Sudeste, Sul e região Litorânea, que se constituem nas regiões com maior densidade demográfica. Isto não significa que não ocorram inundações de grandes proporções em outras regiões do país. Em virtude de não haver população atingida ou não haver prejuízos financeiros diretos, não são registradas inundações em áreas de baixa densidade populacional. O registro e a repercussão da magnitude das inundações, geralmente, são dados pelos prejuízos e danos causados à população (Tucci; Bertoni, 2003).

Em termos de repercussão nacional recente, pode-se citar o desastre natural no litoral norte de São Paulo, no município de São Sebastião, no mês de fevereiro de 2023, quando quase 700 mm de chuva acumulada em 72 h causaram deslizamentos e corridas de detritos sobre as residências da Vila Sahy, causando mais de 50 mortes, além da grande destruição material. Outro desastre com proporções ainda maiores ocorreu no mês de fevereiro de 2022, quando chuvas acima de 250 mm em

3 h, ocorreram em Petrópolis, cidade da região Serrana do Rio de Janeiro, resultando em mais de 100 deslizamentos, enxurradas e inundações, que resultaram na perda de 233 vidas humanas, centenas de desabrigados, danos materiais e ambientais, com prejuízos econômicos e sociais imensuráveis com a avalanche de lama e destruição. Esse evento sucede outro desastre de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro, quando 918 pessoas de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo perderam a vida e 99 pessoas ainda permanecem desaparecidas, na maior catástrofe climática da história do país. Também permanecem na memória nacional os desastres tecnológicos associados com o rompimento das barragens de Brumadinho (2019) e Mariana (2015), no interior de Minas Gerais.

Na região Sul do Brasil, as regiões do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, do Vale do Taquari, do Vale do Caí e do Rio Uruguai, localizadas no Rio Grande do Sul, tem um histórico de convivência, de dificuldades e de prejuízos com as inundações. No Vale do Itajaí, o histórico das inundações está associado com diversos desastres com mortes, como os ocorridos em 2020 (12 mortes) e 2008 (135 mortes). O estudo intitulado *Desastres Naturais no RS: estudo sobre as ocorrências no período 2003 - 2021*, do Departamento de Planejamento Governamental da Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão (DEPLAN/SPGG, 2022), que teve como base as informações do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2iD), demonstrou que entre os anos de 2003 e 2021, o Rio Grande do Sul registrou um total de 4.230 ocorrências de desastres naturais, abrangendo fenômenos naturais extremos, que causaram danos que excedem a capacidade da comunidade atingida em conviver com o impacto provocado.

A maior inundação documentada no Rio Grande do Sul no Século XX ocorreu nos meses de abril e maio de 1941, em toda a região hidrográfica do rio Guaíba, que abrange as bacias hidrográficas dos rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos e Gravataí. Foram registrados índices pluviométricos muito acima do normal, que resultaram na famosa Enchente de 1941 (Guimaraens, 2013). Essa inundação foi um evento traumático para Porto Alegre, como também está no ranking de maior inundação em outros municípios da região metropolitana e do interior do Estado, pela magnitude do evento, efeitos sociais e impactos econômicos. Silveira (2020) estimou que a precipitação pluviométrica média sobre a região hidrográfica do rio Guaíba foi de 588 mm, distribuídas em quatro períodos chuvosos, ao longo de 24 dias. A vazão de pico estimada para Porto Alegre foi de 27.433 m³/s, atingindo o nível máximo de 4,75 m, no dia 08 de maio de 1941 (Silveira, 2020). Em função da magnitude e dos impactos da referida inundação em Porto Alegre, foi implantado um conjunto de medidas estruturais na cidade, que incluíram diques, como o Muro da Mauá e a BR 290, um conjunto de casas de bombas e outros

sistemas complementares e intervenções urbanísticas para controlar as inundações no Guaíba na área urbana da capital gaúcha.

No Vale do Taquari, as inundações que ocorrem são em decorrência de fatores naturais existentes na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. Porém, Ferreira e Both (2001) salientam que as ações antrópicas agravam os problemas causados pelas inundações, intensificando o alcance dos níveis das inundações nas áreas urbanizadas. Considerando que as inundações do Rio Taquari são relativamente lentas e graduais, apesar da grande variação vertical do nível das mesmas, não é comum o registro de mortes associadas com as inundações, mas os impactos materiais e os prejuízos sociais e econômicos são expressivos a cada evento, da ordem de milhões de reais em cada inundação. As cidades do Vale do Taquari mais atingidas pelas inundações, de montante para jusante, são Muçum, Encantado, Roca Sales, Colinas, Arroio do Meio, Lajeado, Estrela, Cruzeiro do Sul, Bom Retiro do Sul e Taquari. Os maiores danos e prejuízos das inundações costumam ocorrer nos municípios de Lajeado e Estrela, que são as cidades mais populosas e que apresentam passivos habitacionais nas áreas de inundações desde a instalação dos municípios.

Estações pluviométricas e fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA) monitoram chuva, vazão e cotas do rio Taquari-Antas desde meados de 1940 em determinadas sessões do referido rio. Muçum e Encantado têm aferições sistemáticas dessa época, até a atualidade, sendo a estação de Muçum com dados desde janeiro de 1940 e a estação de Encantado, desde outubro de 1941. Nas cidades de Lajeado e Estrela, a ANEEL, antiga DNAEE, realizou a aferição dos níveis das inundações do rio Taquari no período de 1940 até 1986. Com a inauguração da Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul e o Porto Fluvial de Estrela em 1977, e a instalação de réguas linimétricas para a operação portuária, o porto passou a aferir e registrar o nível da água do rio Taquari 4 vezes por dia, de forma ininterrupta, desde o ano de 1980 até 2015. O nível de referência das réguas linimétricas no referido porto, utilizadas para aferir a variação do nível da água do rio, é de 13 m desde o início da operação portuária, permanecendo o mesmo nível de referência com os linígrafos automáticos na atualidade.

No período de 1940 até 2023, que abrange 83 anos de coleta sistemática de informações sobre chuva, vazão e nível dos rios, ocorreram 101 eventos de enchentes e inundações nas cidades do Vale do Taquari, representando uma média de mais de 1 evento por ano. Os principais estudos realizados na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas, envolvendo chuva, vazão, nível e mapeamento das inundações, foram realizados por Ferreira e Both (2001), Eckhardt (2008), Bombassaro e Robaina (2010), Kurek (2012), Greiner (2014), CEPED-RS, IPH e GRID (2015), Fadel (2015), Moraes (2016), Siqueira (2016), Agrosig e Feeng (2016), Oliveira *et al.* (2018) e Monte (2022).

Entre os dias 08 e 09 de julho de 2020, ocorreu uma das maiores inundações documentadas no rio Taquari, alcançando até aquela data, o segundo maior nível aferido nas cidades de Muçum (Figura 2), Encantado (Figura 3), Roca Sales e Arroio do Meio (Figura 4). Nas cidades de Lajeado e Estrela, a inundação de 09 de julho de 2020 ocupou até meados de 2023, a 5ª posição na série histórica das maiores inundações desde 1940, quando foi registrada uma variação vertical do nível da água de 14,39 m no Porto Fluvial de Estrela. Esse evento de inundação em Lajeado será alvo de estudo e de retromodelagem no HEC-RAS no presente estudo.

Figura 2 - Cenário da inundação da história na cidade de Muçum, em julho de 2020.



Fonte: JC2 Vídeo Produtora, 2020

Figura 3 - Cenário da inundação de 2020 na cidade de Encantado, mostrando o canal principal do rio Taquari e o alcance das águas na cidade e nas áreas rurais de Roca Sales.



Fonte: Prefeitura de Encantado, 2020

Figura 4 - Registro aéreo da inundação de julho de 2020 na cidade de Arroio do Meio.



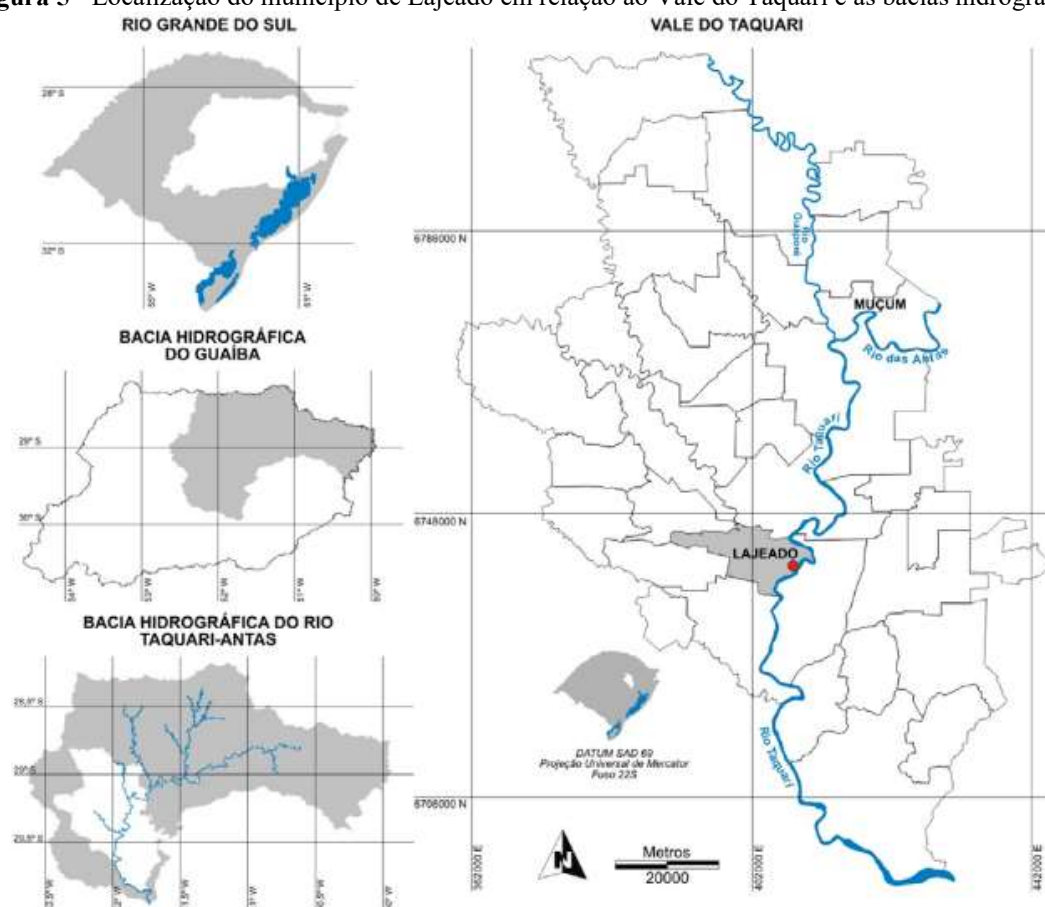
Fonte: Tax Imagens Aéreas, 2020

O presente trabalho está vinculado com a tese de doutorado em **Retromodelagem de eventos extremos de inundações na região do Vale do Taquari**, em desenvolvimento no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS) e tem o objetivo de estudar e proceder a retromodelagem da inundação de julho de 2020 no município de Lajeado, com vistas à melhora da compreensão quanto a complexidade de ocorrência dos eventos extremos na região e contribuição para o aprimoramento da capacidade de monitoramento, previsão, alerta e gerenciamento otimizado dos eventos de inundações.

ÁREA DE ESTUDO

O município de Lajeado consiste na área de estudo do presente trabalho, estando localizado na região centro leste do Rio Grande do Sul, integrando a região geopolítica do Vale do Taquari e na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas (Figura 5). O desenvolvimento de Lajeado se deu a partir da margem direita do Rio Taquari, e da emancipação política do município de Estrela. De acordo com a prévia da população calculada pelo IBGE, com base nos resultados do Censo Demográfico 2022, Lajeado apresenta 97.432 habitantes (IBGE, 2022), representando um acréscimo de 25.987 pessoas e uma variação de +36,37% em relação à população de Lajeado no Censo Demográfico de 2010. Esses números indicam um intenso crescimento populacional em Lajeado nesses 12 anos, associados com a disponibilidade de emprego na indústria, no comércio, nos serviços, presença de boas instituições de ensino, inclusive de nível superior, localização estratégica, boas condições de segurança, de moradia, serviços de saúde e outros aspectos que atuam como atratores sociais.

Figura 5 - Localização do município de Lajeado em relação ao Vale do Taquari e às bacias hidrográficas.



Fonte: Eckhardt, 2008.

Na cidade de Lajeado, o nível de referência do rio Taquari utilizado para vincular os níveis máximos das inundações é de 13 m, sendo que as inundações são registradas quando o rio supera a cota altimétrica de 19 m (variação de 6 m acima do nível de referência). Embora não haja uma série histórica das vazões observadas em Lajeado, o município possui uma série histórica de inundações, documentada com níveis históricos (níveis não sistemáticos) e níveis aferidos em réguas linimétricas e linígrafos automáticos (níveis sistemáticos), contemplando a data de ocorrência da inundação e o nível máximo atingido em cada inundação desde 1940 (Moraes, 2016).

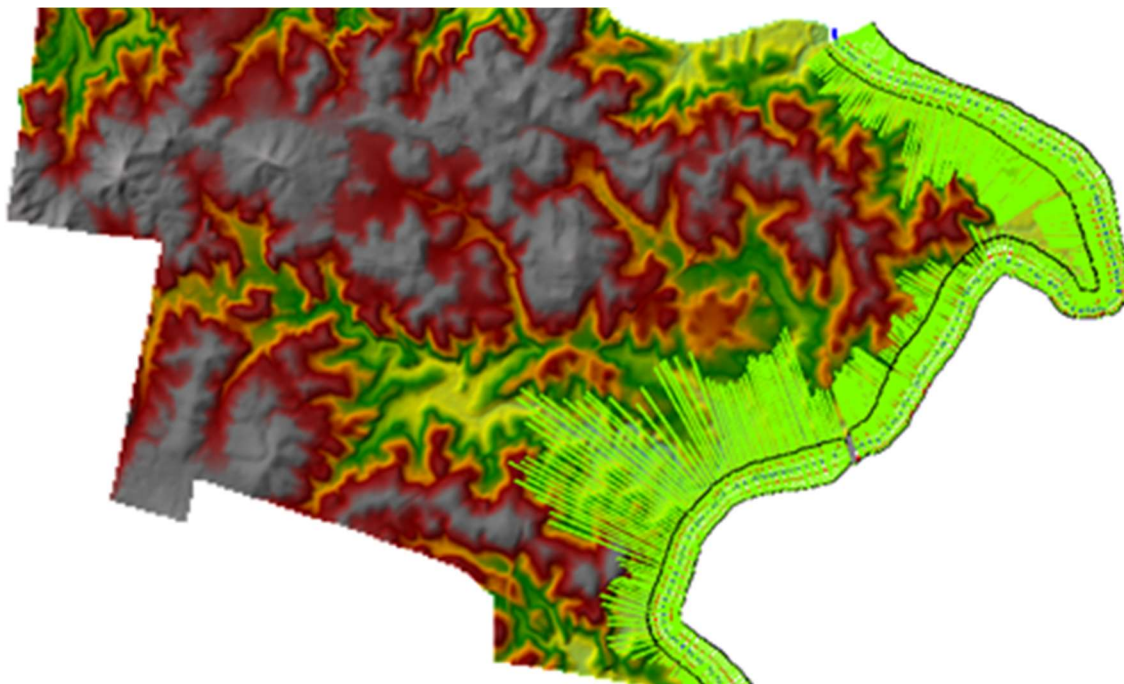
MATERIAIS E MÉTODOS

Para executar a caracterização e proceder à retromodelagem da inundação de julho de 2020 no município de Lajeado, incluindo a simulação hidrodinâmica e o mapeamento da mancha de inundação, foram utilizados dados de chuva, vazão estimada, nível, modelo digital do terreno, batimetria do canal principal, seções topobatimétricas transversais, coeficiente de *Manning* e outros

parâmetros no software HEC-RAS. Os materiais, equipamentos e *softwares* utilizados nas etapas metodológicas e para alcançar ao objetivo proposto estão relacionados na sequência:

- Série histórica dos níveis máximos das inundações: atualizada com base nos registros do Núcleo de Informações Hidrometeorológicas (NIH) da Univates, do extinto Sistema de Previsão e Alerta de Enchentes (SPAEE), do Porto Fluvial de Estrela e das estações pluviométricas e fluviométricas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e da Agência Nacional de Águas (ANA), disponíveis no HidroWeb, com informações que abrangem o período de 1940 até 2022 e do SACE, que é a plataforma desenvolvida pelo CPRM para acompanhar o nível e os alertas de inundações para o Rio Taquari-Antas de forma automatizada e em tempo real.
- Microsoft Excel: *Software* utilizado para analisar o banco de dados das séries históricas das precipitações pluviométricas, vazões, inundações e geração de tabelas e gráficos.
- GPS e GNSS RTK: O GPS (*Global Positioning System*) e o GNSS RTK (*Global Navigation Satellite System - Real Time Kinematic*) foram utilizados para a coleta das coordenadas e dos níveis altimétricos em campo alcançados no momento de pico da inundação de julho de 2020.
- AutoCAD MAP: *Software* de desenho digital utilizado para editar as bases digitais, organizar o banco de dados cartográfico e favorecer a compatibilidade com os demais *softwares*.
- ArcGis 10.5: *Software* utilizado para a geração do Modelo Digital do Terreno (MDT), a partir das curvas de nível e geração dos *layouts* dos mapas e simulações das inundações.
- Modelo Digital do Terreno (MDT) composto com a Topobatimetria: desenvolvido pela combinação de duas fontes de informações altimétricas (curvas de nível, em escala 1:2.000, interpoladas pela Rede Triangular Irregular (*Triangulated Irregular Network – TIN*), combinado com a topobatimetria do canal principal do rio Taquari, resultado no MDT composto (Figura 6).

Figura 6 - MDT composto de Lajeado, com a projeção das seções transversais topobatimétricas, utilizado como *input* na modelagem hidrodinâmica da inundação de 09 de julho de 2020, no município de Lajeado, no software HEC-RAS.



Fonte: dos autores.

- 2 Estações Fluviométricas (Hidroweb CPRM/ANA): Encantado (86720000) e Muçum (86510000), contemplando informações diárias das vazões observadas para ambas as estações e de nível somente na estação de Encantado.
- 25 Estações Pluviométricas (Hidroweb CPRM/ANA): Passo Tainhas (2850009), Cazusa Ferreira (2850016), Monte Alegre dos Campos (2850020), Antônio Prado (2851003), Fazenda Roseira (2851010), Passo do Prata (2851021), Passo Migliavaca (2851022), Prata (2851024), Trinta e Cinco (2851028), Guaporé (2851044), Muitos Capões (2851051), Nossa Senhora de Fátima (2851052), Auler (2852004), Ilópolis (2852014), Campo do Meio (2852052), Camisas (2950008), Lajeado Grande (2950019), Seca (2950033), Vila Tainhas (2950063), Jansen (2951017), Muçum (2951070), Linha José Júlio (2951092), Barros Cassal (2952001), São José do Herval (2952038), Boqueirão do Leão (2952036).
- HEC-RAS 5.0.7: *Software* de modelagem hidrodinâmica e simulação das áreas sujeitas às inundações para o evento de julho de 2020 no município de Lajeado.

Após ocorrer a atualização e a consolidação da série histórica das inundações para os municípios de Lajeado e Encantado, houve a organização das informações da precipitação pluviométrica diária e acumulada em 10 dias (240 h) e 3 dias (72 horas) antes da ocorrência do pico

da inundação de 09 de julho de 2022, registrado às 02:00 da manhã em Lajeado, que ocorreram na abrangência da bacia hidrográfica Taquari-Antas, a montante da área de estudo. As informações da precipitação pluviométrica acumulada foram consideradas do dia 29 de junho até 08 de julho, incorporando as informações consistidas das 25 estações pluviométricas do portal Hidroweb.

Na sequência, foi organizado o hidrograma das vazões do rio Taquari durante a ascensão, estabilização e declínio da inundação dos dias 08 e 09 de julho de 2020, aferidas nas estações fluviométricas da CPRM/ANA, disponíveis no portal do Hidroweb, localizadas a montante da cidade de Lajeado, nos municípios de Encantado (Estação 86720000) e Muçum (Estação 86510000). Nessa etapa, também foram organizados os hidrogramas da evolução da inundação, integrando o nível da inundação com intervalo de hora em hora para as cidades de Lajeado e Encantado.

Posteriormente, foi organizada a base digital vetorial e matricial incorporada na modelagem da inundação no HEC-RAS, contemplando o MDT composto com a topobatimetria, as seções transversais topobatimétricas e os pontos de validação marcados em campo com GPS e GNSS RTK, durante o pico da inundação de 09 de julho de 2020, no município de Lajeado. As demais informações geoespaciais, como o traçado do canal principal do rio Taquari e das laterais do leito menor, além dos parâmetros da modelagem foram definidas diretamente no HEC-RAS.

No *software* de modelagem HEC-RAS, a simulação hidrodinâmica da propagação das vazões pode ser realizada considerando o fluxo em 1D, 2D ou 3D. No fluxo 1D, o HEC-RAS permite que o regime de escoamento no canal ocorra em regime permanente ou não permanente. Em 2D somente é possível realizar as modelagens em regime de fluxo não permanente. Em cada um desses casos, o HEC-RAS aplica diferentes equações matemáticas que não serão detalhadas aqui. **Neste trabalho, as modelagens foram realizadas com fluxo 1D, em regime de escoamento permanente.**

A execução da modelagem hidrodinâmica com fluxo permanente 1D foi realizada com base no manual hidráulico do HEC-RAS (USACE-RAS, 2016). Foram inseridos como *inputs* da modelagem, o MDT composto de Lajeado (Figura 6); as seções transversais topobatimétricas com equidistância de 50 m; a declividade do canal ($0,0003 \text{ m.m}^{-1}$); o coeficiente de *Manning*, utilizados de acordo com os valores definidos por Chow (1959), para o canal principal (0,04) e para margens (0,03); as infraestruturas (Barragem Eclusa de Bom Retiro do Sul e Ponte da BR 386) e; ajustados os valores de vazão, compreendidas no intervalo mínimo com base em Lopes (2018) e máximo de Fadel (2015) e considerando as vazões observadas nas estações fluviométricas 86720000 (Encantado => 10/1941 até 10/2022) e 86510000 (Muçum => 01/1940 até 07/2022) do Hidroweb (ANA, 2023), uma

vez que não há informações observadas de vazão por estações fluviométricas localizadas na área de estudo (Lajeado) ou nas adjacências.

Considerando que não há registros da vazão medidos em Lajeado, a vazão de *input* foi ajustada no HEC-RAS, dentro do intervalo de valores coerentes, até que os resultados da modelagem hidrodinâmica e da simulação da mancha de inundação tivessem uma concordância positiva com a área de inundação observada em Lajeado, com base em um conjunto de pontos de validação aferidos em campo com GPS e RTK, durante o nível mais alto da inundação de 09 de julho de 2020. Os referidos pontos foram utilizados para validar os resultados da modelagem no HEC-RAS, permitindo ajustar a vazão e modelar as manchas de inundações de outros eventos menores e maiores em Lajeado. A Figura 7 apresenta a metodologia simplificada da modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS.

As análises estatísticas foram realizadas a partir da verificação de proximidade da lâmina propagada pelo modelo com pontos coletados a campo, sendo verificados as diferenças horizontais e verticais entre os dados, além da aplicação da raiz do erro quadrático médio - RMSE (*Root Mean Squared Error*), calculado a partir da aplicação da equação a seguir, onde, n é o número de amostras; y_i é o valor observado para a amostra i e p_i é o valor modelado para a amostra i .

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2} \quad \text{Equação (1)}$$

Figura 7 - Fluxograma simplificado da estrutura da metodologia.



Fonte: dos autores.

RESULTADOS

Os primeiros resultados do trabalho envolvem a apresentação da Série Histórica Consolidada dos Níveis das Inundações (Tabela 1) registradas em Lajeado e Encantado, localizada a montante da área de estudo, contemplando registros pareados desde 1940. Conforme detalhado na metodologia, os registros foram organizados a partir de um conjunto de fontes, a partir de registros sistemáticos.

Tabela 1 - Série Histórica Consolidada das Inundações de Lajeado e Encantado.

Data	Nível observado das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado* das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado** das inundações Encantado (m)
18/07/1940	26,40	25,70	-
06/05/1941	29,92***	29,22***	47,25
18/11/1941	25,93	25,23	38,52
20/05/1942	23,90	23,20	39,77
25/06/1944	22,66	21,96	38,24
27/01/1946	27,40	26,70	45,47
02/08/1948	20,60	19,90	38,37
17/10/1950	26,33	25,63	44,37
16/09/1953	23,11	22,41	41,37
27/09/1954	27,35	26,65	46,27
19/05/1955	20,31	19,61	38,22
06/04/1956	28,86	28,16	47,10
09/09/1957	22,85	22,15	41,27
13/06/1958	21,80	21,10	40,49
23/06/1959	26,63	25,93	44,36
01/09/1960	22,70	22,00	40,75
30/09/1961	22,80	22,10	41,42
18/10/1963	22,70	22,00	38,46
22/08/1965	26,40	25,70	46,23
06/08/1966	22,00	21,30	39,68
21/09/1967	26,33	25,63	45,23
16/03/1971	22,70	22,00	38,17
29/08/1972	23,40	22,70	42,72
21/09/1972	21,20	20,50	39,41
19/09/1973	22,20	21,50	40,11
10/06/1974	21,00	20,30	-
11/08/1975	19,80	19,10	38,12
09/08/1976	22,40	21,70	41,71
03/08/1977	21,10	20,40	41,8
19/08/1977	23,90	23,20	42,68
30/07/1980	21,08	20,38	41,57
23/08/1980	21,70	21,00	41,52
29/06/1982	24,96	24,26	43,41

Data	Nível observado das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado* das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado** das inundações Encantado (m)
24/10/1982	22,70	22,00	41,33
12/11/1982	21,20	20,50	40,17
03/05/1983	20,45	19,75	39,42
07/07/1983	24,75	24,05	44,47
02/08/1983	20,26	19,56	39,03
18/08/1983	22,84	22,14	42,62
09/07/1984	20,45	19,75	39,04
11/10/1986	19,60	18,90	38,02
15/05/1987	19,65	18,95	39,32
30/07/1987	21,35	20,65	39,30
15/08/1987	19,65	18,95	39,13
14/09/1988	24,25	23,55	43,97
25/09/1988	22,40	21,70	39,09
06/07/1989	20,65	19,95	40,21
13/09/1989	25,20	24,50	46,12
25/09/1989	25,90	25,20	46,16
01/06/1990	26,64	25,94	47,24
13/10/1990	22,10	21,40	41,32
29/05/1992	25,35	24,65	46,17
06/07/1993	21,15	20,45	41,17
04/08/1997	25,60	24,90	45,77
16/10/1997	19,70	19,00	38,27
16/08/1998	21,55	20,85	41,57
14/10/2000	23,45	22,75	43,47
21/07/2001	26,30	25,60	46,47
02/10/2001	26,95	26,25	47,35
13/06/2002	22,20	21,50	42,04
03/07/2002	19,45	18,75	38,17
21/02/2003	21,70	21,00	42,77
09/07/2003	19,65	18,95	37,97
27/10/2003	20,74	20,04	39,22
16/12/2003	20,38	19,68	38,34
19/05/2005	20,94	20,24	40,72
17/10/2005	22,95	22,25	43,06
27/07/2006	19,86	19,16	38,81
11/07/2007	24,52	23,82	45,64
24/09/2007	26,25	25,55	46,42
27/10/2008	26,65	25,95	46,67
10/08/2009	21,55	20,85	39,34
13/09/2009	24,50	23,80	44,67
28/09/2009	21,75	21,05	40,99
05/01/2010	23,95	23,25	40,17
23/09/2010	21,55	20,85	41,07

Data	Nível observado das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado* das inundações em Lajeado (m)	Nível consolidado** das inundações Encantado (m)
27/03/2011	19,50	18,80	39,12
21/07/2011	26,85	26,15	47,27
10/08/2011	24,66	23,96	44,05
20/09/2012	21,25	20,55	42,07
25/08/2013	23,83	23,13	43,17
13/06/2014	19,89	19,19	39,24
20/10/2014	20,49	19,79	39,09
15/07/2015	21,35	20,65	41,06
21/09/2015	22,10	21,40	40,53
10/10/2015	24,51	23,81	43,72
15/07/2016	22,6	21,90	42,78
10/20/2016	25,26	24,56	45,14
05/28/2017	21,39	20,69	38,03
06/09/2017	24,36	23,66	-
10/13/2017	19,69	18,99	39,17
10/04/2018	18,51	17,81	-
07/09/2020	27,39	26,69	48,04
07/14/2020	22,03	21,33	40,29
04/05/2022	20,52	19,82	40,16
13/07/2023	22,20	21,50	41,44
05/09/2023	29,53	28,83	49,56****
08/10/2023	21,70	21,00	41,13
13/10/2023	19,92	19,22	38,83
18/10/2023	20,44	19,74	38,80
19/11/2023	28,94	28,24	48,38

* Nível consolidado das inundações de Lajeado considerando as conclusões de Greiner (2014).

** Nível consolidado das inundações de Encantado, somando 27,77 m aos valores observados, para ajustar com a altitude do terreno em relação ao nível do mar.

*** Há divergência nas fontes sobre o nível máximo da inundação de 1941 para a cidades de Lajeado e Estrela. As evidências atuais baseadas em levantamentos de campo, indicam que a inundação de 1941 foi 51 cm inferior à inundação de 05 de setembro de 2023 no centro da cidade de Lajeado, devendo esta ser alvo de avaliações mais completas e atualização da marca histórica.

**** Maior nível registrado em Encantado antes dos sensores automáticos do CPRM pararem de transmitir. O Rio Taquari continuou subindo por mais cerca de 8 horas antes do nível estabilizar. Ainda serão realizadas atividades de campo para aferir o nível máximo da inundação em Encantado vinculado com os referenciais de nível do IBGE.

Ao observar a série histórica de inundações de Lajeado e Encantado, no período de 1940 até 2023, ocorreram um total de 101 inundações, representando uma média acima de 1 evento por ano. Na cidade de Lajeado, em observação à série histórica de inundações até o ano de 2022, a maior inundação registrada até então, foi em 06 de maio de 1941, com nível de 29,22 m, com a ressalva que todas as evidências e aferições em realização, indicam que esse nível está superestimado. Em

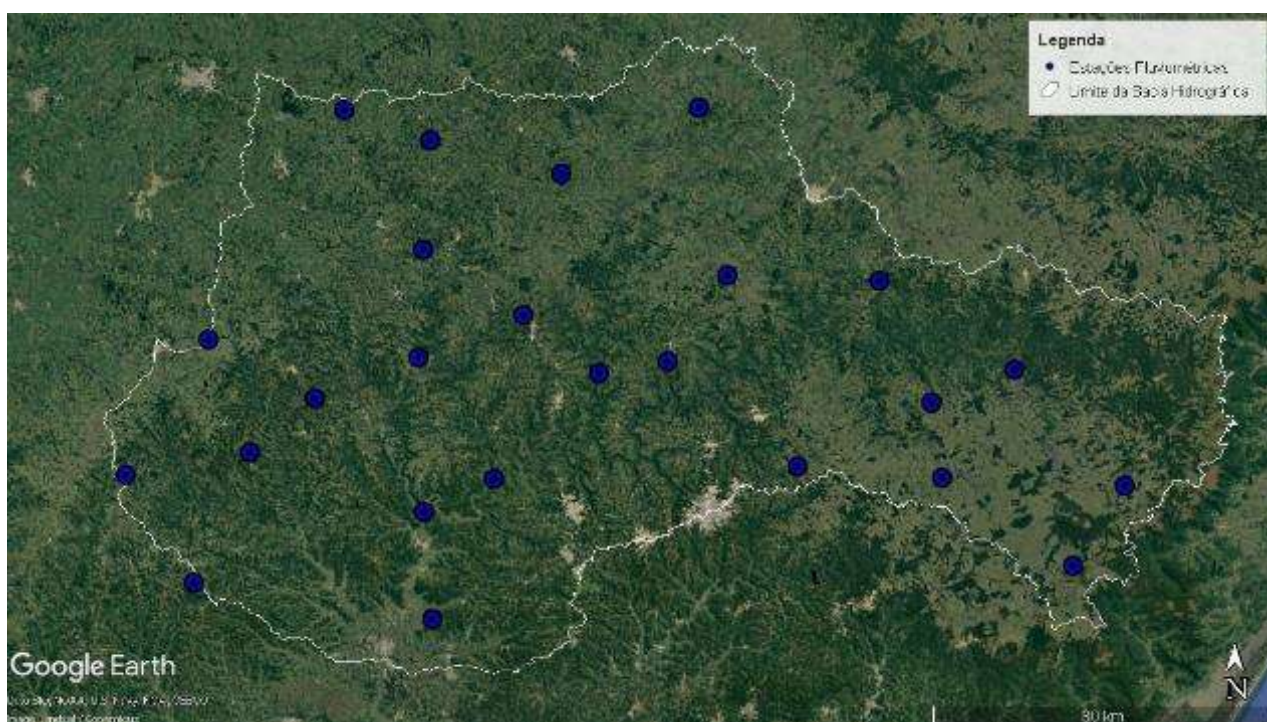
Encantado, a maior inundação havia sido registrada em 07 de julho de 2020, quando o Rio Taquari inundou os terrenos até o nível de **48,04 m** (*a inundação de 2023 superou o evento de 2020 em mais de 2 metros*), enquanto em Lajeado a inundação teve variação vertical de 14,39 m, inundando áreas até a altitude topográfica de 26,69 m. A **Tabela 1** apresenta a precipitação diária acumulada por dia, 10 dias antes da inundação de 09 de julho de 2020, com base nas informações de 25 estações pluviométricas na bacia hidrográfica Taquari-Antas.

Tabela 1 - Chuvas diárias acumuladas registradas na bacia Taquari-Antas nos 10 dias que antecederam a inundação de 09 de julho de 2020.

Estação Pluviométrica Hidroweb	Código da estação	Long.	Lat.	29/6	30/6	1/7	2/7	3/7	4/7	5/7	6/7	7/7	8/7	Precipitação acumulada 10 dias	Precipitação acumulada 3 dias
Muçum	2951070	-51,8681	-29,1664	0	102,5	76,0	2,1	0	2,7	5,0	39,5	12,5	125,7	366,0	177,7
Passo Tainhas	2850009	-50,4561	-28,8675	0	60,4	80,4	0,0	0	0	0,0	79,1	19,8	128,9	368,6	227,8
Cazuza Ferreira	2850016	-50,6542	-28,9375	0	54,0	32,0	0,0	0	0	3,2	56,4	11,0	139,0	295,6	206,4
Monte Alegre dos Campos	2850020	-50,7808	-28,6839	0	89,7	5,1	0,0	0	0	78,1	0,0	122,3	65,1	360,3	187,4
Antônio Prado	2851003	-51,2844	-28,8533	0	67,1	63,2	5,9	0	0	3,0	64,6	23,6	123,1	350,5	211,3
Fazenda Roseira	2851010	-51,1428	-28,6733	0	108,2	3,4	0,0	0	0	0,0	70,1	119,1	84,8	385,6	274,0
Passo do Prata	2851021	-51,4483	-28,8775	0	108,2	3,4	0,0	0	0	0,0	70,1	119,1	84,8	385,6	274,0
Passo Migliavaca	2851022	-51,8667	-28,6194	0	60,2	45,5	1,5	0	0	3,3	50,2	51,1	140,1	351,9	241,4
Prata	2851024	-51,6283	-28,7561	0	66,8	46,5	2,5	0	0	0,0	57,6	31,1	125,2	329,7	213,9
Trinta e Cinco	2851028	-51,8489	-28,3911	0	42,0	41,0	2,0	0	0	0,0	60,0	63,0	104,0	312,0	227,0
Guaporé	2851044	-51,8792	-28,8444	0	77,8	69,4	0,2	0	0	4,1	47,7	15,7	134,9	349,8	198,3
Muitos Capões	2851051	-51,2111	-28,3239	0	55,4	14,4	0,0	0	0	3,5	35,4	37,5	100,0	246,2	172,9
Nossa Senhora de Fátima	2851052	-51,5378	-28,4619	0	49,4	2,9	0,0	0	0	0,0	62,5	56,7	116,7	288,2	235,9
Auler	2852004	-52,3817	-28,8039	0	105,0	41,0	0,0	0	0	0,0	54,5	30,0	140,0	370,5	224,5
Ilópolis	2852014	-52,1275	-28,9283	0	106,0	1,7	0,0	0	0	21,4	44,6	12,4	157,7	343,8	214,7
Campo do Meio	2852052	-52,0536	-28,3264	0	57,3	47,5	2,0	0	0	0,0	56,3	50,5	103,9	317,5	210,7
Camisas	2950008	-50,1875	-29,1083	0	59,4	75,8	0,0	0	0	0,0	53,9	24,5	154,8	368,4	233,2
Lajeado Grande	2950019	-50,6275	-29,0942	0	61,6	44,8	1,6	0,2	0	16,4	36,9	19,0	141,6	322,1	197,5
Seca	2950033	-50,9739	-29,0719	0	60,4	80,4	0,0	0	0	0,0	79,1	19,8	128,9	368,6	227,8
Vila Tainhas	2950063	-50,3106	-29,2769	0	8,2	120,0	0,0	0	0	0,0	21,1	78,0	102,0	329,3	201,1
Jansen	2951017	-51,8489	-29,3908	0	105,1	88,9	8,8	0	0	0,0	54,5	58,0	73,1	388,4	185,6
Linha José Júlio	2951092	-51,6997	-29,0978	0	90,0	76,0	2,8	0	0	2,0	51,0	10,0	137,0	368,8	198,0
Barros Cassal	2952001	-52,5844	-29,085	0	97,4	13,2	6,7	0	0	0,0	0,0	48,3	116,9	282,5	165,2
São José do Herval	2952038	-52,2847	-29,0406	0	115,9	0,0	0,0	0	0	0,0	60,0	50,0	70,0	295,9	180,0
Boqueirão do Leão	2952036	-52,4225	-29,3125	0	73,4	40,7	0,0	0	0	0,0	38,4	20,2	114,8	287,5	173,4
Média Acumulada das Precipitações Pluviométricas Diárias				0	75,3	44,5	1,4	0	0,1	5,6	49,7	44,1	116,5	337,3	210,4

A enchente do Rio Taquari-Antas, de 09 de julho de 2020, que resultou em uma das maiores inundações da história do Vale do Taquari, com base nas informações de 25 estações pluviométricas instaladas na bacia hidrográfica (Figura 8), foi precedida por uma precipitação acumulada de 210,4 mm em 72 horas (3 dias) e uma precipitação média acumulada de 116,5 mm no dia anterior da inundação. Em 240 horas, que representam 10 dias antes da inundação, a precipitação média acumulada somou 337,3 mm de precipitação, que representam valores muito expressivos.

Figura 8 - Localização das 25 estações pluviométricas na bacia hidrográfica Taquari-Antas, acima da cidade de Lajeado, utilizadas para dimensionar a precipitação ocorrida antes da inundação de 09/07/2020.



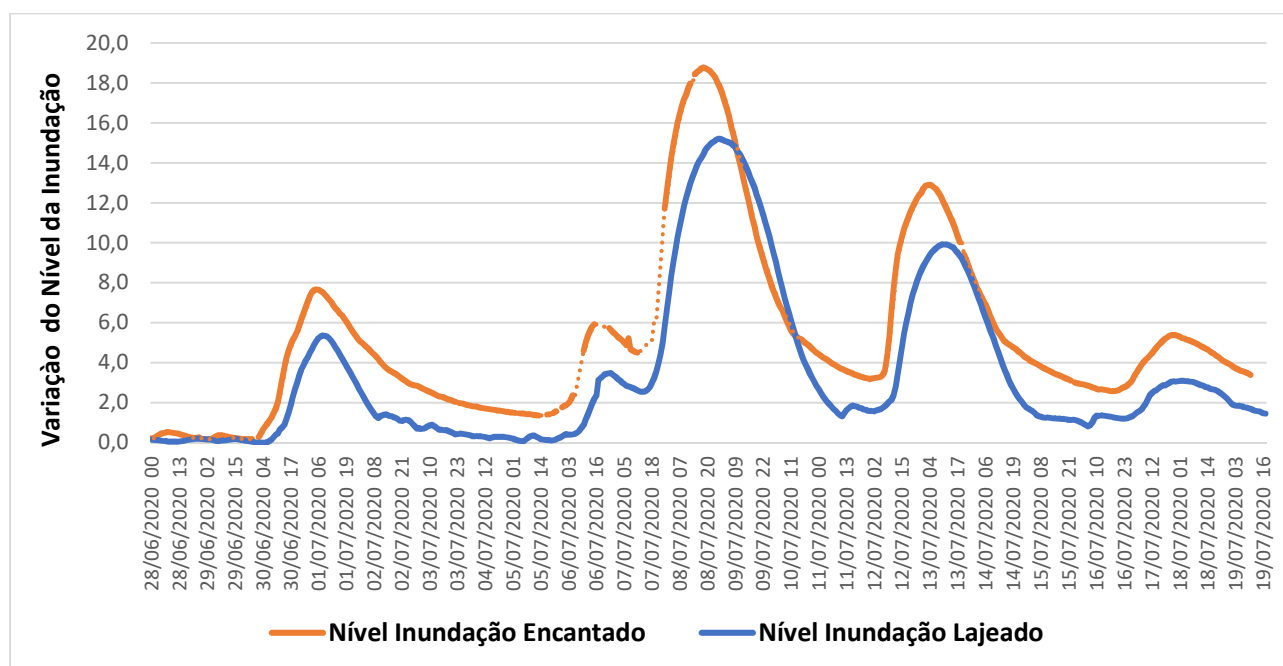
Fonte: dos autores.

Nas duas estações fluviométricas localizadas a montante de Lajeado, que são as estações de Encantado (86720000) e Muçum (86510000), houve falha na leitura da vazão no dia em que a inundação de 2020 atingiu o nível mais alto. Considerando que as réguas linimétricas e linígrafos automáticos do SACE aferiram o maior nível histórico de inundação em Encantado em 2020, há certeza que as vazões do rio Taquari também superaram todas as vazões observadas por eventos anteriores de inundação. Dessa forma, foi realizada uma pesquisa das vazões máximas observadas nessas duas estações durante outros eventos de inundações da série histórica. **A maior vazão histórica observada na estação de Muçum foi de 12.763,41 m³/s, registrada durante a inundação de 01/10/2001. E a maior vazão registrada na estação fluviométrica de Encantado foi de**

13.323,47 m³/s, durante a inundação de 21/07/2011. Essas vazões máximas registradas em Muçum (2001) e Encantado (2011) resultaram em 2 inundações de magnitude extrema em Lajeado, conforme pode ser observado na Tabela 1, menores somente 50 cm que o nível de pico da inundação de 2020.

Na cidade de Lajeado, a inundação de 09 de julho de 2020, foi registrada pelos linígrafos automáticos do sistema SACE do CPRM/ANA, com o nível de 27,39 m, tendo como referência de nível 13 m no Porto Fluvial de Estrela. Em Encantado, a inundação atingiu o nível de 48,04 m, tendo como referência de nível 27,77 m. Dessa forma, o rio Taquari registrou variação vertical de nível de 18,77 m em Encantado e de 14,39 m em Lajeado, que representa uma diferença de 4,38 m entre as duas cidades. A Figura 9 apresenta o hidrograma de todo o evento de inundação, de 09 de julho de 2020, para as cidades de Encantado e Lajeado.

Figura 9 - Hidrograma do evento de inundação de 09 de julho de 2020 para as cidades de Encantado e Lajeado.



Fonte: dos autores.

A cota consolidada da inundação de julho de 2020, ajustado a partir das conclusões de Greiner (2014), foi de 26,69 m em Lajeado. O ajuste nos níveis observados das inundações pelo sistema SACE, conforme recomendação de Greiner (2014), permite a realização do mapeamento das manchas das inundações em conformidade com as curvas de nível da base digital municipal, amarrada com os marcos de Rede de Referência Cadastral Municipal (RRCM) de Lajeado, compatibilizando os resultados com o Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano. Os melhores ajustes da modelagem

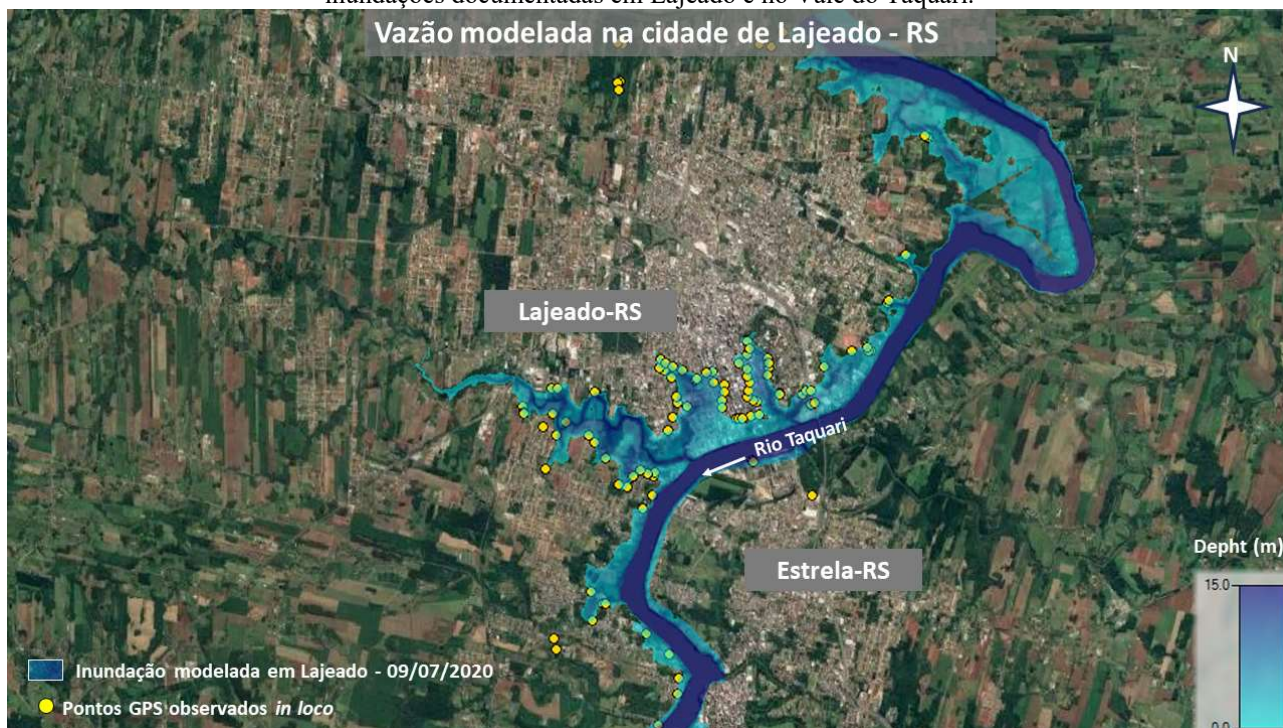
hidrodinâmica no HEC-RAS, que realiza a propagação das vazões (Figura 10) e a espacialização da mancha de inundação para Lajeado no momento de pico (Figura 11), foram obtidos com uma vazão de entrada de 18.100,00 m³/s no modelo. Com o referido valor estimado de vazão máxima para Lajeado, durante o pico da inundação de 09 de julho de 2020, os resultados da modelagem e da projeção da mancha de inundação tiveram bom ajuste com os pontos de validação aferidos em campo com GPS e GNSS RTK, coletados durante o pico da inundação (Figura 12).

Figura 10 - Modelagem hidrodinâmica e propagação das vazões da inundação de 09 de julho de 2020 no HEC-RAS para Lajeado, a partir de uma vazão de input de 18.100 m³/s.



Fonte: dos autores.

Figura 11 - Mancha simulada da inundação de 09 de julho de 2020, que alcançou o nível topográfico ajustado de 26,69 m (GREINER, 2014) em Lajeado, com o ajuste dos pontos de validação de campo, representando uma das maiores inundações documentadas em Lajeado e no Vale do Taquari.



Fonte: dos autores.

127

Figura 12 - Cenário da inundação de 09 de julho de 2020 na cidade de Lajeado, com delineamento do canal principal do rio Taquari. Houve ótima correspondência entre os locais atingidos pela inundação com base nas observações de campo com os resultados da modelagem hidrodinâmica.



Fonte: dos autores.

As análises estatísticas e validações são processos importantes, pois validam o modelo, os parâmetros e a própria modelagem. A análise estatística quanto ao nível máximo de alcance da propagação da vazão, calculado com base na seleção de 21 pontos de observação em campo, realizados no horário mais próximo ao pico da inundação, que ocorreu às 02:00h da manhã do dia 09 de julho de 2020, resultaram em um erro médio vertical de 0,54 m e erro médio horizontal de 2,71 m. O RMSE referente ao ajuste altimétrico (*Root Mean Squared Error* - a raiz quadrática média dos erros entre valores observados e modelados) resultou em 1,32 m, já o RMSE para o ajuste horizontal foi de 16,70 m. Os resultados indicam uma qualidade satisfatória e até melhores, em alinhamento com a qualidade dos mapeamentos realizados por Eckhardt (2008) e Moraes (2016).

CONCLUSÕES

A inundação de 09 de julho de 2020 está categorizada atualmente como sendo a terceira maior inundação registrada nos municípios de Muçum, Encantado e Roca Sales e a sexta maior inundação registrada nas cidades de Lajeado e Estrela, considerando a série histórica de inundações de 1940 em diante. O evento de inundação foi precedido por um período de intensas chuvas convectivas, originadas por uma frente-fria, que ocorreram de forma muito homogênea na área de abrangência da bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas. Ocorreram 337,3 mm de precipitação acumulada média em 10 dias antes da inundação, média de 210,4 mm nas 72 horas anteriores à inundação e uma precipitação média acumulada de 116,5 mm no dia anterior da inundação. As chuvas registradas na bacia hidrográfica resultaram em uma vazão estimada de 14.938,54 m³/s em Encantado e de uma vazão modelada de 18.100,00 m³/s em Lajeado.

Os resultados da modelagem hidrodinâmica da inundação no HEC-RAS para o município de Lajeado, considerando o modelo de escoamento 1D utilizado com fluxo permanente, se mostraram fidedignos e satisfatórios, uma vez que houve boa correspondência entre a propagação das vazões e a mancha de inundação simulada com as áreas de inundação observadas em campo durante o nível mais alto do evento e que foram registrados por um conjunto de pontos de validação com GPS.

A implementação de um processo de modelagem 1D ou 2D com fluxo de água não permanente permite modelar o comportamento hidrodinâmico, a propagação das vazões e a simulação das manchas de inundação, considerando diferentes momentos do hidrograma do evento de inundação de 2020, sendo alvo das próximas etapas de modelagem, buscando ainda, o melhor ajuste de vazões, com base nas simulações desenvolvidas no presente trabalho e ajustes estatísticos observados. Os processos de modelagem e de simulação no HEC-RAS permitem conhecer a dinâmica dos eventos

extremos de inundação, especialmente as condições de chuva, vazão e nível, contribuindo na delimitação das áreas de risco, na adoção de ações preventivas e de resposta, além de favorecer a melhora do gerenciamento dos eventos naturais extremos, com potencial para gerar desastres naturais. Está no planejamento dos autores realizar a retromodelagem da maior inundação registrada na região hidrográfica do Guaíba, com foco na região de estudo deste trabalho, ocorrida em 06 de maio de 1941 e, que foi responsável por danos e prejuízos ainda hoje na memória de muitas cidades localizadas nas adjacências dos principais rios do Rio Grande do Sul.

REFERÊNCIAS

ANA (Agência Nacional das Águas). **Hidroweb**. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>. Acesso em: 22 mar. 2023.

AGROSIG; FEENG. **Relatório técnico final topobatimétrico no trecho do Rio Taquari compreendido entre a cidade de Encantado-RS e a barragem de bom retiro do Sul-RS**: Levantamento, consolidação e processamento de dados para determinação das seções.: 1. Porto Alegre: [s. n.], 2016.

BOMBASSARO M.; ROBAINA L. E. de S. **Contribuição Geográfica para o Estudo das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Taquari-Antas, RS**. Geografias artigos científicos: Belo Horizonte 06 (2), 2010, 69-86.

CASTRO, A.L.C. **Glossário de Defesa Civil**: estudo de riscos e medicina de desastres. Brasília: MPO/Departamento de Defesa Civil, 1998, 133 p.

CPRM (Serviço Geológico do Brasil). **Processos Hidrológicos**: Inundações, enchentes, enxurradas e alagamentos na geração de áreas de risco. Curso de Capacitação de Técnicos Municipais para Prevenção e Gerenciamento de Riscos de Desastres Naturais. CPRM: Vitória, 2017. Disponível em: <https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Capacitacao/Material%20Did%C3%A1tico/CBPRG%20-%202017/Processos%20Hidrol%C3%B3gicos%20-%20Inunda%C3%A7%C3%B5es,%20Enchentes,%20Enxurradas%20e%20Alagamentos%20na%20Gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Riscos.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

CEPED (Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres). **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010**: volume Brasil. Florianópolis: CEPED/UFSC; 2012.

CEPED-RS; IPH; GRID. **Desenvolvimento e apoio à implantação de uma estratégia integrada de prevenção de riscos associados a regimes hidrológicos na Bacia do Taquari-Antas**. Porto Alegre: [s. n.], 2015.

DEPLAN/SPGG (Departamento de Planejamento Governamental da Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão). **Desastres Naturais no RS: estudo sobre as ocorrências no período 2003 - 2021**. DEPLAN/SPGG: Porto Alegre. Disponível em: <https://planejamento.rs.gov.br/upload/arquivos/202211/22111507-desastres-naturais-2003-2021.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2023.

ECKHARDT, R. R. **Geração de Modelo Cartográfico Aplicado ao Mapeamento das Áreas Sujeitas às Inundações Urbanas na Cidade de Lajeado / RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2008.

ERVIN, G.N.; HARTTER, J. **Landscape and Livelihoods: Co-Evolving with Social and Ecological Systems in East Africa**. Landscape and Urban Planning, 2020, 197, 103766. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103766>

FADEL, A. W. **Incorporação do risco de prejuízo no gerenciamento de medidas de controle de inundação**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2015.

FERREIRA, E. R.; BOTH, G. C. **Estudo das enchentes no Vale do Taquari: causas e propostas de controle**. In: MEPP, 4. Lajeado. Anais... Lajeado: UNIVATES, 2001. 171 p.

130

GREINER, C. **Avaliação do referencial de nível das inundações da cidade de Lajeado/RS**. Monografia (graduação) (Curso de Engenharia Ambiental). Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2014. 85 p.

GUIMARAENS, R. **A Enchente de 41**, Porto Alegre: Libretos, 2009. 100 p.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Resultados Preliminares do Censo Demográfico 2022. Disponível em: https://www.lajeado.rs.gov.br/arquivos/download_anexo/tabela%20com%20a%20evolu%C3%A7%C3%A3o%20populacional%20de%20todos%20munic%C3%ADpios.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

KUREK, R. K. M. **Avaliação do tempo de retorno dos níveis das inundações no Vale do Taquari/RS**. Monografia (graduação). Curso de Engenharia Ambiental. Centro Universitário UNIVATES. Lajeado/RS, 2012.

LAMBIN, E. F.; MEYFROIDT, P. **Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change**. Land Use Policy, 27(2), 2010, 108-118. doi: 10.1016/j.landusepol.2009.09.003

LOPES, V.A.R. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento**. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2018.

MARCELINO, E.V. **Desastres Naturais e Geotecnologias: conceitos básicos**. Caderno Didático nº 1. INPE/CSR: Santa Maria, 2008.

MONTE, B. **CRBi: um índice de risco de inundações desenvolvido para municípios brasileiros**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental - 2022. <http://hdl.handle.net/10183/239034>.

MORAES, S. R. **Mapeamento das áreas e edificações atingidas pelas inundações do Rio Taquari na área urbana do município de Lajeado/RS**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10737/997>. Acesso em: 23 mar. 2023.

NUNES, L.H. **Urbanização e desastres naturais: abrangência América do Sul**. Oficina de Textos, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, G. G. **Modelos para Previsão, Espacialização e Análise das áreas Inundáveis na Bacia Hidrográfica do Rio Caí, RS**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, G. G.; ECKHARDT, R. R.; HAETINGER, C.; ALVES, A. **Caracterização espacial das áreas suscetíveis a inundações e enxurradas na bacia hidrográfica do rio Taquari-Antas**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 37, n. 4, 2018, p. 849 -863.

SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental - Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?** Brasília: MMA, 2007. 192p.

SILVEIRA, A. L. L. **Chuvas e vazões da grande enchente de 1941 em Porto Alegre/RS**. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul, 35, 2020, 69-90.

SIQUEIRA, V. A. et al. **Previsão de cheias por conjunto a partir de previsões operacionais do EPS regional ETA na bacia do Taquari-Antas/RS**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 587–602, 2016. Available at: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616004>

TOBIM, G.A; MONTZ, B.E. **Natural hazards: explanation and integration**. New York: The Guilford Pres, 1997, 388 p.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do (Orgs). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (ORG.) **Inundações Urbanas da América do Sul**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003. 471p

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. de. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1995. 428 p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos)

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), 2009. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDR_TerminologyEnglish.pdf. Acesso em: 23 mar. 2023.

UNISDR. **The human cost of weather related disasters: 1995-2015**. CRED / UNISDR, 2016. Disponível em: https://www.unisdr.org/files/46796_cop21weatherdisastersreport2015.pdf. Acesso em: 22 mar. 2023.

UNISDR. **Manuals and Guides: Preparing For Community**. Intergovernmental Oceanographic Commission, 2020, 298.

USACE-RAS. **River Analysis System, HEC-RAS v5.0 - 2D Modeling User's Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2016, 171 p.

USACE-RAS. **River Analysis System, HEC-RAS v5.0 - Hydraulic Reference Manual**. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. 2016, 547 p.