



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AYANE APARECIDA DA SILVA RIBEIRO

**LEVANTAMENTO DE REGISTROS DE INUNDAÇÃO POR MEIO DE
APLICATIVOS MÓVEIS EM *SMARTPHONES* E SUA UTILIZAÇÃO NO
MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS**

Caruaru
2023

AYANE APARECIDA DA SILVA RIBEIRO

**LEVANTAMENTO DE REGISTROS DE INUNDAÇÃO POR MEIO DE
APLICATIVOS MÓVEIS EM *SMARTPHONES* E SUA UTILIZAÇÃO NO
MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestra em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Cirilo

Caruaru

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Paula Silva - CRB/4 - 1223

R484l Ribeiro, Ayane Aparecida da Silva.
 Levantamento de registros de inundação por meio de aplicativos móveis em
 Smartphones e sua utilização no mapeamento de áreas inundáveis. / Ayane Aparecida
 da Silva Ribeiro. – 2023.
 79 f.; il.: 30 cm.

 Orientador: José Almir Cirilo.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Pós-
 Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2023.
 Inclui Referências.

 1. Inundações. 2. Mapeamento do solo. 3. Avaliação de riscos. 4. Sensoriamento
 remoto. 5. Interpolação. 6. Aplicativos móveis. I. Cirilo, José Almir (Orientador). II.
 Título.

CDD 620 (23. ed.)

UFPE (CAA 2023-096)

AYANE APARECIDA DA SILVA RIBEIRO

**LEVANTAMENTO DE REGISTROS DE INUNDAÇÃO POR MEIO DE
APLICATIVOS MÓVEIS EM *SMARTPHONES* E SUA UTILIZAÇÃO NO
MAPEAMENTO DE ÁREAS INUNDÁVEIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Aprovada em: 28/07/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Almir Cirilo (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dedico este trabalho a Deus, porque dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas, e aos meus pais, João e Silvania por todo amor e apoio em todas as etapas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos criou e foi engenhoso nessa tarefa, meu guia, infinita fonte de força e inspiração.

Aos meus pais, João e Silvania, por todo amor e carinho recebido em todas as fases da minha vida, e por sempre me ensinarem o valor do estudo, essa vitória é nossa.

Aos meus irmãos, Amanda e Arthur, meus companheiros de vida, sou grata a Deus por partilhar tantas histórias juntos.

Ao Prof. José Almir Cirilo, meu orientador e grande amigo, por toda confiança, ensinamentos, oportunidades e incentivos. De modo que até aqui carrego não só conhecimentos sobre a área de recursos hídricos, mas também acerca da sua sabedoria e ética profissional.

À minha querida e inesquecível avó, Josefa Silvestre (*in memoriam*), que foi o meu referencial de força e amor.

A Gabriel Araújo, idealizador do Hidromapp, prestativo, empenhado e entusiasta.

Às minhas amigas Suellen e Karoline, que com zelo e paciência me auxiliaram em todo o levantamento de campo.

Aos meus amigos e companheiros de jornada, dentre os quais cito em ordem alfabética, Amanda, Ana Vírginia, Bruna, Hellen, Igor, Isabela, Júlia, Luana, Luciano, Mariana, Merllyen, Snorem e Tales, obrigada por todas as experiências compartilhadas, vocês deixam minha vida mais leve.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), pelo apoio e conhecimento transmitido ao longo deste período.

A José Marcelo servidor da secretaria do PPGECA/UFPE, por toda a disponibilidade e presteza em assegurar o desenvolvimento das atividades no programa.

À Universidade Federal de Pernambuco pela oportunidade de realização do mestrado, proporcionado por um ensino de qualidade.

A Alfredo e Artur pelas contribuições e palavras de apreço ao trabalho.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela concessão da bolsa de mestrado, sendo assim um importante instrumento de inclusão social e desenvolvimento científico no Estado de Pernambuco.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, ao longo de minha vida, se tornaram grandes amigos.

E o rio levava tudo
A felicidade do vizinho
E o rio levava tudo
O pão quentinho da padaria Beira Rio
E o rio levava tudo
O toque agudo da campainha da escola na esquina
E o rio levava tudo
A academia, a creche, a quadra
E o rio levava tudo
A praça, a ponte, a via
E o rio levava tudo
Os lares, os planos, os desejos
E o rio levava tudo
A alegria, a calma, a vida
E o rio levava tudo
Mas pelo anseio de que tudo que leva um dia traz
O ribeirinho retirante sonha apenas por um instante
Que o rio também lhe traga paz.¹

¹ E o rio levava tudo, de autoria de Ayane Aparecida da Silva Ribeiro, não publicado, 2023.

Será que você não sabe? Nunca ouviu falar? O Senhor é o Deus eterno, o Criador de toda a terra. Ele não se cansa nem fica exausto, sua sabedoria é insondável. Ele fortalece ao cansado e dá grande vigor ao que está sem forças. (BÍBLIA, A. T., Isaías, 40:28-29).

RESUMO

O presente estudo buscou investigar a utilização de aplicativos móveis em *smartphones*, especificamente o aplicativo Hidromapp, como ferramenta técnica de suporte para a coleta de marcas de cheia, incluindo também a aplicação dos dados coletados no mapeamento de áreas de inundação. Para tal, no município de Jaqueira-Pernambuco, foram coletadas em campo informações sobre a inundação ocorrida em maio de 2017, utilizando *smartphones* e o aplicativo Hidromapp. As informações foram posteriormente utilizadas como dados de entrada para a modelagem e reconstituição da mancha de inundação, por meio do Modelo Digital do Terreno de alta resolução (Pernambuco Tridimensional – PE3D) e de técnicas de geoprocessamento, dentre as quais foram avaliados os seguintes interpoladores espaciais, determinísticos e exatos, *Inverse Distance Weighting* (IDW), *Multilevel B-Spline* e *Triangulated Irregular Network* (TIN). Para a investigação dos resultados, a mancha de inundação reconstituída foi comparada com parte do conjunto de dados coletados em campo, reservados à validação, a partir de métricas estatísticas (RMSE, MAE e Pbias). O aplicativo apresentou bom desempenho como ferramenta de apoio à coleta de dados de marcas de cheia em campo. O método aplicado permitiu uma estimativa adequada do evento reconstituído, em que a planície alagada apresentou grau de similaridade satisfatório aos dados comparados.

Palavras-chave: inundações; mapeamento de risco; LiDAR; interpolação espacial; Hidromapp.

ABSTRACT

The present study sought to investigate the use of mobile applications on smartphones, specifically the Hidromapp application, as a technical support tool for the collection of flood marks, also including the application of the data collected in the mapping of flood areas. To this end, in the municipality of Jaqueira-Pernambuco, information about the flood that occurred in May 2017 was collected in the field, using smartphones and the Hidromapp application. The information was later used as input data for modeling and reconstitution of the floodplain, through the high resolution Digital Terrain Model (Pernambuco Tridimensional - PE3D) and geoprocessing techniques, among which the following spatial interpolators were evaluated, deterministic and exact, Inverse Distance Weighting (IDW), Multilevel B-Spline and Triangulated Irregular Network (TIN). To investigate the results, the reconstructed floodplain was compared with part of the data set collected in the field, reserved for validation, based on statistical metrics (RMSE, MAE and Pbias). The application performed well as a tool to support the collection of data from flood marks in the field. The applied method allowed an adequate estimation of the reconstituted event, in which the floodplain presented a satisfactory degree of similarity to the compared data.

Keywords: floods; risk mapping; LiDAR; spatial interpolation; Hidromapp.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 -	Análise de desastres naturais por tipologia: 1980-1999 <i>versus</i> 2000-2019.....	20
Gráfico 2 -	Análise de desastres naturais por tipologia: 2022 <i>versus</i> 2002-2021.....	22
Quadro 1 -	Categorização dos desastres naturais quanto ao CRED e COBRADE.....	22
Figura 1 -	Representação de cenários de inundações ribeirinhas.....	23
Quadro 2 -	Estratégias e medidas interventivas à gestão de inundações.....	26
Quadro 3 -	Síntese de tipologia de modelos hidrodinâmicos.....	30
Quadro 4 -	Metodologias distintas acerca do uso de dados coletados <i>in loco</i>	32
Gráfico 3 -	Aplicação de dispositivos móveis voltada para fins técnicos e científicos.....	34
Mapa 1 -	Localização do município de Jaqueira na Bacia do Rio Una.....	38
Gráfico 4 -	Regime pluviométrico anual para o município de Jaqueira-PE.....	40
Gráfico 5 -	Regime pluviométrico mensal para o município de Jaqueira-PE.....	41
Fotografia 1 -	Impactos da inundação ocorrida em maio de 2017 em Jaqueira-PE.....	41
Figura 2 -	Representação da interface do aplicativo Hidromapp dentre as etapas de coleta de dados.....	43
Fotografia 2 -	Registros da coleta de marcas de inundação em Jaqueira - PE.....	44
Mapa 2 -	Pontos coletados com o aplicativo Hidromapp em Jaqueira - PE.....	45
Figura 3 -	Metodologia TIN para formação de planos por vértices de triângulos.....	49
Figura 4 -	Processo cartográfico aplicado à delimitação da mancha de inundação.....	51

Gráfico 6 -	Desvio planimétrico dos pontos coletados via GPS no Hidromapp.....	55
Figura 5 -	Interface do aplicativo para registro de dados coletados em campo.....	56
Mapa 3 -	Mancha reconstituída com o interpolador <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW) para o município de Jaqueira-PE.....	59
Mapa 4 -	Mancha reconstituída com o interpolador <i>Multilevel B-Spline</i> para o município de Jaqueira-PE.....	61
Mapa 5 -	Mancha reconstituída com o interpolador <i>Triangulated Irregular Network</i> (TIN) para o município de Jaqueira-PE.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Ranking de países com maior número de pessoas atingidas por desastres naturais no mundo em 2022.....	21
Tabela 2 -	Quantitativo de afetados pelas inundações na América Latina e Caribe no período compreendido entre 2000 e 2019.....	25
Tabela 3 -	Métricas calculadas acerca dos interpoladores investigados.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa
COBRADE	Centro de Classificação e Codificação Brasileira de Desastres Naturais
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters
ed.	Edição
EM-DAT	Emergency Disasters Data Base
et al.	e outros
GIS	Geographic Information System
GNSS	Global Navigation Satellite System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighting
LiDAR	Light Detection And Ranging
MAE	Mean Absolute Error
MDT	Modelo Digital do Terreno
OCHA	United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
ONU	Organização das Nações Unidas
Org.	Organizador, organização
Pbias	Percent Bias
PE3D	Pernambuco Tridimensional
PTV	Root Mean Squared Error
RMSE	Small Programmable Object Technology
SPOT	Triangulated Irregular Network
TIN	Volunteered Geographic Information
VGI	Particle Tracking Velocimetry

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos Específicos.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESASTRES HIDROLÓGICOS...	20
2.1.1	Medidas interventivas de controle e mitigação das inundações.....	26
2.1.2	Técnicas de mitigação dos danos.....	29
2.2	APLICAÇÃO DE <i>SMARTPHONES</i> NA ENGENHARIA.....	33
2.2.1	O aplicativo Hidromapp.....	36
3	METODOLOGIA.....	38
3.1	ÁREA DE ESTUDO E EVENTO RECONSTITUÍDO.....	38
3.2	COLETA DE DADOS COM <i>SMARTPHONES</i>	42
3.3	VERIFICAÇÃO E AJUSTE DOS PONTOS COLETADOS.....	45
3.4	RECONSTITUIÇÃO DA MANCHA INUNDADA.....	46
3.4.1	Interpolação espacial.....	46
3.4.1.1	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	47
3.4.1.2	<i>Splines</i>	48
3.4.1.2.1	<i>Multilevel B-Spline</i>	48
3.4.1.3	<i>Triangulated Irregular Network (TIN)</i>	49

3.4.2	Técnicas de geoprocessamento.....	50
3.5	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	DISPONIBILIDADE DE DADOS EM CAMPO.....	54
4.2	DESEMPENHO DO APLICATIVO HIDROMAPP.....	54
4.3	MANCHA DE INUNDAÇÃO RECONSTITUÍDA E DESEMPENHO DOS MODELOS PROPOSTOS.....	57
4.3.1	Mancha reconstituída pelo interpolador <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW).....	57
4.3.2	Mancha reconstituída pelo interpolador <i>Multilevel B-Spline</i>	60
4.3.3	Mancha reconstituída pelo interpolador <i>Triangulated Irregular Network</i> (TIN).....	62
5	CONCLUSÕES.....	65
6	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

A população mundial atingiu 8 bilhões de pessoas em 2022, com 55% vivendo em áreas urbanas. Ademais, de acordo com as previsões atuais, estima-se que a população global crescerá para 9,7 bilhões até 2050, com cerca de 68% da população mundial vivendo em áreas urbanas (UN, 2022).

De fato, a rápida expansão urbana em diferentes partes do mundo levou a mudanças significativas nos tipos de uso e cobertura terrestre (OPENYEMI; WEI; OLUSOLA, 2019). Efetivamente, a urbanização leva à modificação de uso do solo, bem como da sua estrutura quantitativa, resultando na destruição do processo do ciclo hidrológico (WANG; WU; FAN, 2022). Com efeito, além de ser a alteração antropogênica mais drástica da cobertura do solo, a urbanização geralmente resulta em uma mudança significativa da hidrologia local e regional.

Posto isto, a urbanização das cidades e consequentemente a redução de superfícies permeáveis, a ocupação de planícies de inundação dos cursos de águas e em alguns casos, a limitação destes em canais, que não respeitam a morfologia e ciclos naturais, tem acentuado fenômenos de inundação, em geral repentinos e inesperados. Retratando assim, a ineficiência da política de desenvolvimento urbano, sobretudo quanto ao planejamento de uso e ocupação do solo (GIUNTOLI, 2008).

Inundações são eventos naturais que afetam a vida dos seres humanos desde a antiguidade. Dentre todos os tipos de desastres naturais, as inundações são os que impactam o maior número de pessoas, deixando centenas de milhares de desabrigados todos os anos (MOORE *et al.*, 2005; TUNG, 2002). De fato, esse é o tipo de fenômeno hídrico que mais contribuiu para o aumento das perdas monetárias e perdas de vida relacionadas a desastres naturais (ARRIGHI *et al.*, 2013; BLÖSCHL *et al.*, 2015; KUNDZEWICZ *et al.*, 2014). Isto posto, apesar do aumento do conhecimento sobre aspectos como previsão, modelagem e mapeamento de inundações e correlatos, eventos desta natureza continuam ocorrendo com bastante frequência, tornando-os um dos riscos mais frequentes e generalizados (RANA; ROUTHAY, 2018).

Certamente, não é possível controlar o aumento do número de ocorrências das inundações severas. Todavia, medidas preventivas e mitigadoras devem se tornar mais eficazes e acessíveis, objetivando diminuir os danos e o número de pessoas afetadas. Desse modo, a necessidade de se compreender os fenômenos naturais

quanto a sua ocorrência, seus mecanismos e dinâmica é fundamental para adoção de medidas protetivas (MOURA; CANIL, 2017). De modo similar, de acordo com Yalcin e Akyurek (2004), alguns problemas relacionados às inundações podem ser solucionados através de estudos planejados e projetos detalhados acerca de áreas propensas a esses eventos.

Consoante à pauta, Becchi (2001) elenca também que o aumento da periculosidade dos fenômenos hidrológicos é intrínseco à crescente falta de preparo da população frente aos eventos hídricos. Sob essa visão, a educação sobre os riscos naturais representa uma arma eficaz contra as inundações. Isto posto, destacam-se a importância do conhecimento do território, das ações humanas interventivas, bem como dos eventos catastróficos já verificados; o planejamento de estratégias de evacuação e o conhecimento de áreas com maior dano associado, visando gerir o amparo às vítimas.

Além disso, os prejuízos causados pelos desastres naturais, sobretudo os danos relativos à vida humana, demonstram a importância de trabalhos voltados para a temática, na qual têm aumentado recentemente o número de pesquisas relacionadas ao uso de geotecnologias aplicadas na gestão de riscos e desastres (OLIVEIRA, 2017). As ferramentas de modelagem trazem a possibilidade de contribuição para a gestão do uso do solo e então minimização das perdas ou mitigação dos problemas decorrentes destes eventos (GARCIA; ALIXANDRINI JÚNIOR, 2022). Dentre as ferramentas, o mapeamento de áreas de riscos é essencial para a gestão de desastres, principalmente no que diz respeito à prevenção e ao planejamento de ações, visando reduzir as ameaças e vulnerabilidades, e assim contribuir para a qualidade de vida e segurança da população.

Em suma, o conhecimento socioambiental do território e de suas áreas de riscos é fundamental para garantir a efetividade das políticas públicas de defesa civil. Entretanto, por vezes, o mapeamento de áreas de riscos não tem sido realizado por municípios brasileiros, particularmente àqueles de pequeno porte, devido à indisponibilidade de dados cartográficos e/ou de recursos técnicos e financeiros necessários para a sua elaboração.

Neste contexto, o presente estudo tem como propósito explorar a aplicabilidade de *smartphones* enquanto ferramenta técnica de suporte para a coleta georreferenciada de marcas de eventos hidrológicos, e a reconstituição de manchas de inundação a partir de dados coletados via *smartphones*. Na forma de estudo de

caso, buscou-se a estruturação de um arcabouço teórico-metodológico acerca de metodologias de base empírica para o mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de inundações no município de Jaqueira-PE.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a utilização do aplicativo Hidromapp para a coleta de registros de inundações, bem como para o mapeamento de áreas de riscos hidrológicos, visando o aprimoramento da plataforma enquanto ferramenta de uso técnico a baixo custo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Evidenciar procedimentos metodológicos para aplicação dos dados coletados com o aplicativo Hidromapp no mapeamento de áreas inundáveis;
- b) Identificar melhorias a serem realizadas no aplicativo Hidromapp;
- c) Colaborar para a disseminação de ferramentas de baixo custo no tocante ao mapeamento e gestão de riscos hidrológicos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESASTRES HIDROLÓGICOS

Mudanças climáticas globais são as prováveis causas do aumento da frequência de eventos climáticos extremos. Além do mais, a interação do homem com a natureza contribui para transformação de eventos naturais físicos em desastres naturais com significativos impactos negativos sobre as condições ambientais e socioeconômicas (BORGIA *et al.*, 2011; DATAR *et al.*, 2013; FABRE *et al.*, 2018; MARCELINO, 2008; MATA-LIMA *et al.*, 2013). Seus efeitos, que afetam desde a produção de alimentos até o aumento do nível do mar, amplificando o risco de inundações catastróficas, têm desestabilizado as sociedades e o meio ambiente de uma maneira global sem precedentes.

Posto isto, no intervalo entre 2000 e 2019, 7.348 eventos de desastres foram notificados mundialmente pela *Emergency Disasters Data Base* (EM-DAT), uma das mais importantes bases de dados internacionais, um aumento de aproximadamente 75% se comparado ao período compreendido entre 1980 e 1999 (CRED, 2020). Dentre os eventos de desastres registrados, citam-se secas, terremotos, temperaturas extremas, inundações, deslizamentos de terra, movimentos de massa, tempestades, atividades vulcânicas e incêndios, conforme ilustrado pelo Gráfico 1.

Gráfico 1 - Análise de desastres naturais por tipologia: 1980-1999 *versus* 2000-2019.



Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de CRED (2020).

Inundações, tempestades, notificações de temperaturas extremas, tremores de terra e deslizamentos ocupam lugar de destaque nos relatos supracitados. De fato, inúmeras são as explicações para o aumento do número de registros. Em parte, deve-se à melhora da inscrição e disseminação de informações. Todavia, as mudanças climáticas, o aumento irregular da taxa de urbanização, bem como o desmatamento e a degradação ambiental são os principais responsáveis pelo crescimento do índice de desastres naturais, em particular os hidrológicos (CEPED, 2012; LEANING; GUHA-SAPIR, 2013).

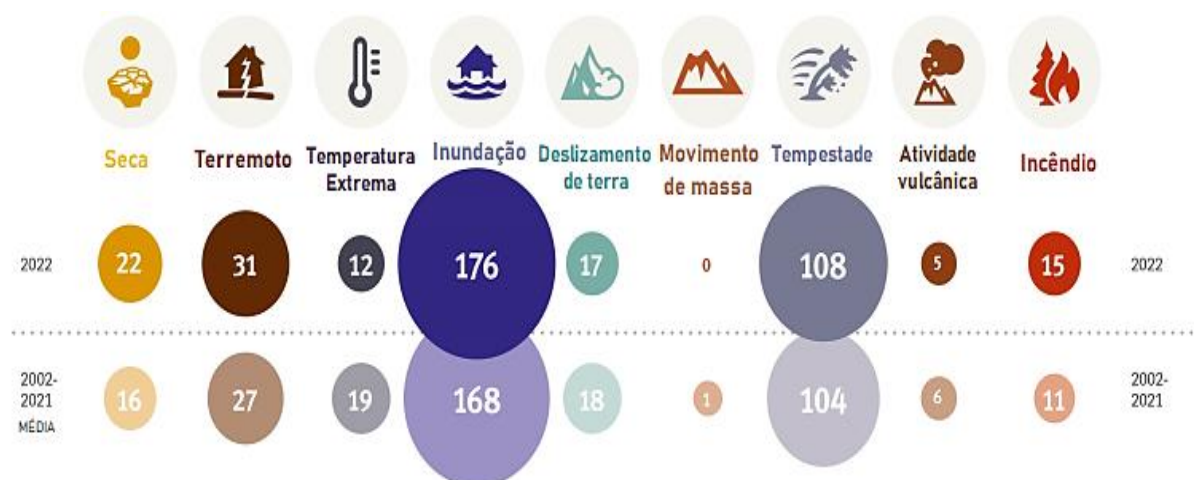
Em uma abordagem recente, o EM-DAT divulgou que em 2022 pelo menos 387 desastres naturais foram relatados, com registro de 30.704 números de óbitos e 185 milhões de afetados, um custo equivalente a U\$ 223,8 bilhões (CRED, 2023). Dessa forma, a Tabela 1 retrata os 10 países com maior quantidade de pessoas afetadas devido aos eventos de desastres naturais.

Tabela 1 - *Ranking* de países com maior número de pessoas atingidas por desastres naturais no mundo em 2022.

Local	Tipo de desastre	Total de pessoas afetadas
Paquistão	Inundação	33.000.000
Congo	Seca	26.000.000
Etiópia	Seca	24.100.000
Nigéria	Seca	19.100.000
Sudão	Seca	11.800.000
Bangladesh	Inundação	7.200.000
China	Seca	6.100.000
Nigéria	Seca	4.400.000
Burquina Fasso	Seca	3.500.000
Filipinas	Tempestade	3.300.000

Fonte: CRED (2023).

Decerto, os desastres naturais têm marcado a existência humana ao longo da história, associados à grande morbidade e mortalidade. Posto isto, destaca-se a incidência de episódios de inundações e tempestades, reafirmado também pelo Gráfico 2, a qual ilustra a comparação entre o quantitativo médio de desastres ocorridos no período compreendido entre 2022-2021 e os registrados em 2022.

Gráfico 2 - Análise de desastres naturais por tipologia: 2022 *versus* 2002-2021.

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de CRED (2023).

Ante ao exposto, as tipologias de desastres estão diretamente relacionadas às classes de ameaças, de forma que os riscos hidrológicos são caracterizados pela presença de agentes de natureza hidrológica. Com efeito, o *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED) classifica os eventos a partir de fatores determinantes de ocorrências. No Brasil, a categorização dos desastres varia, embora o Centro de Classificação e Codificação Brasileira de Desastres Naturais (COBRADE) assuma em maior parte a classificação do CRED. O Quadro 1 apresenta a classificação dos subgrupos de desastres naturais e seus tipos principais segundo o CRED e o COBRADE.

Quadro 1 - Categorização dos desastres naturais quanto ao CRED e COBRADE.

Classificação - CRED	Principais tipos	Classificação - COBRADE	Principais tipos
Geofísico	Terremotos	Geológico	Terremotos
	Atividade vulcânica		Emanações vulcânicas
	Movimento de massa (seca)		Movimentos de massa
Meteorológico	Tempestades		Erosão
	Temperaturas extremas	Meteorológico	Tempestades
	Nevoeiro		Temperaturas extremas
Hidrológico	Inundações		Ciclones
	Movimento de massa (úmida)	Hidrológico	Inundações
			Enxurradas
			Alagamentos

Classificação - CRED	Principais tipos	Classificação - COBRADE	Principais tipos
Climatológico	Secas	Climatológicos	Secas
	Incêndios		
Biológico	Epidemias	Biológicos	Epidemias
	Pragas		Pragas
	Infestações de insetos		Infestações de insetos

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Guha-Sapir *et al.* (2014) e COBRADE.

De acordo com a classificação brasileira, os desastres hidrológicos são categorizados em inundações, enxurradas e alagamentos. De modo que estão relacionados aos danos causados por fluxos de água superiores à capacidade da infraestrutura de drenagem (alagamentos) ou de corpos hídricos naturais (inundações), podendo ser agravados quando ocorrem com alta velocidade de escoamento (enxurradas).

De fato, definir e discernir os conceitos torna-se fundamental para entender como os fenômenos atuam no espaço. De acordo com Tucci (2008) as ameaças hidrológicas são caracterizadas pelas inundações ribeirinhas, descritas pelo transbordamento de cursos hídricos naturais, não considerando os eventos associados exclusivamente à drenagem urbana construída, como alagamento de valas, vias e calçadas. Assim, as inundações que se configuram como ameaças ocorrem quando o corpo hídrico se eleva, em virtude de precipitações intensas, para cotas superiores ao seu leito natural (menor) e atinge áreas ocupadas (Figura 1).

Figura 1 - Representação de cenários de inundações ribeirinhas.



Fonte: Tucci (2008).

Para Goerl e Kobiyama (2005) o conceito de inundações é utilizado apenas para caracterizar ameaças hidrológicas, subdivididas em inundações graduais e bruscas. Semelhante às inundações ribeirinhas em seu leito menor (TUCCI, 2008), as inundações graduais se referem ao transbordamento do corpo hídrico em sua planície natural de inundação, ainda que sejam áreas que permaneçam secas em determinados períodos.

Já as inundações bruscas, de modo análogo às ribeirinhas no leito maior, extrapolam a planície natural de inundação dos corpos hídricos e geralmente estão associadas a elevados índices pluviométricos. Estas podem causar danos de grandes proporções, sobretudo quando ocorrem em cotas elevadas de inundação e alta velocidade de escoamento (GOERL; KOBAYAMA, 2005; TUCCI, 2008).

Entretanto, Few *et al.* (2004) comentam que devido a diferentes percepções e terminologias utilizadas para inundações, há uma dificuldade de padronização categórica. Pois a cada evento, adquirem-se características particulares, inerentes à localidade de ocorrência. Essas particularidades, geralmente, estão relacionadas a diferentes alturas e velocidades no tocante ao confinamento em estreitos vales ou espalhamentos através de planícies.

Desse modo, consensualmente, esse tipo de desastre é resultado da combinação de precipitações intensas com a superação da capacidade de escoamento de sistemas de drenagem, acarretando o acúmulo hídrico em infraestruturas urbanas.

Consoante às considerações, de acordo com dados do Relatório de Desastres Naturais na América Latina e Caribe, as inundações tornaram-se o tipo de evento mais comum para a região, com 548 notificações no período compreendido entre 2000 e 2019. Posto isto, apesar de relativamente possuir um baixo índice de mortalidade ligada diretamente às inundações, elas afetaram aproximadamente 41 milhões de pessoas, com um saldo de U\$ 26 bilhões em danos totais (OCHA, 2020).

Conforme o supracitado, a Tabela 1 descreve o *ranking* dos dez países com maior número de pessoas afetadas por esse tipo de desastre hídrico no território da América Latina e Caribe. Com destaque à conjuntura do Brasil, que além de ocupar uma posição relevante, encontra-se entre os 15 países do mundo com o maior número de população exposta ao risco de inundações (OCHA, 2020).

Tabela 2 - Quantitativo de afetados pelas inundações na América Latina e Caribe no período compreendido entre 2000 e 2019.

Países	Total de pessoas afetadas
Colômbia	10.108.000
Brasil	7.406.000
Peru	4.484.000
México	3.456.000
República Dominicana	2.995.000
Bolívia	2.960.000
Argentina	1.440.000
Paraguai	1.198.000
Guatemala	1.035.000
Honduras	948.000

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de OCHA (2020).

Em ratificação aos dados, o Relatório de Danos Materiais e Prejuízos decorrentes de Desastres Naturais no Brasil (1995 – 2019) identificou uma quantia de R\$ 333,36 bilhões em perdas econômicas relacionadas a eventos naturais extremos, com destaque aos de natureza hídrica, que totalizaram R\$ 114,89 bilhões, equivalente a 34,47% de todo o montante (UFSC, 2020).

Em uma abordagem recente, o Relatório de Desastres Naturais na América Latina e Caribe relatou que chuvas extremas, inundações e deslizamentos de terra induziram perdas substanciais em 2021, levando centenas de vidas perdidas, dezenas de milhares de casas destruídas ou danificadas e centenas de milhares de pessoas desalojadas. De modo que enchentes e deslizamentos em regiões dos Estados da Bahia e Minas Gerais lideraram uma perda estimada em U\$ 3,1 bilhões (OCHA, 2022).

De fato, a incidência de eventos envolvendo desastres hidrológicos no Brasil tem sido recorrente, principalmente em virtude ao acelerado processo de urbanização e concentração populacional (ROLNIK, 2001). Este modelo de expansão, também denominado urbanização de risco, promove o acesso desigual ao solo, sobretudo para fins habitacionais, potencializando a ocupação de áreas de risco como encostas e margens de rios, principalmente por populações de baixa renda.

Destarte, compreender os desafios sociais e econômicos impostos pelas mudanças climáticas torna-se fundamental para o planejamento de medidas interventivas e técnicas de mitigação e prevenção ao dano, com o intuito de gerenciar

o crescimento urbano, as políticas de investimentos, a gestão fiscal e a proteção comum frente à ocorrência de eventos de desastres.

2.1.1 Medidas interventivas de controle e mitigação das inundações

Os meios de manejo das águas superficiais de uma bacia urbana visam harmonizar as funções que os dispositivos naturais têm no ciclo hidrológico com a necessidade de expansão urbana, a fim de contribuir com a preservação da capacidade de retenção dos canais de propagação hidráulica, a permeabilidade do solo e a cobertura vegetal, mantendo as suas características de infiltração, retenção e o armazenamento das várzeas (BARTH,1997).

O planejamento, desenvolvimento e gestão de um sistema eficaz de drenagem urbana numa estratégia de mitigação de inundações ocorrem através de uma combinação coordenada de medidas estruturais e não estruturais (KUNDZEWICZ, 2002; MAKSIMOVIC; TODOROVIC, 1998; TUCCI; VILLANUEVA, 1999). Isto posto, Tucci (2001) menciona que a integração entre soluções estruturais e medidas não estruturais deve ser compatível com o controle do desenvolvimento urbano, considerando a bacia como um todo e não trechos isolados.

Com efeito, o Quadro 2 elenca estratégias e soluções estruturais e não estruturais que usualmente fazem parte de planos de gestão contra inundações, dadas pela Organização Meteorológica Mundial (2004).

Quadro 2 - Estratégias e medidas interventivas à gestão de inundações.

Estratégia	Medidas	Classificação
Redução de Inundações	Represas e reservatórios	Estrutural
	Diques e obras de contenção	Estrutural
	Desvio de avenidas	Estrutural
	Gestão de bacias	Não estrutural
	Melhoramento de canais	Estrutural
Redução da vulnerabilidade aos danos	Regulamentação das planícies de inundação	Não estrutural
	Políticas de desenvolvimento e reaproveitamento	Não estrutural
	Código habitacional e de construção	Não estrutural
	Estruturas a prova de enchentes	Estrutural
	Previsão e alerta de enchentes	Não estrutural
Mitigação dos efeitos das inundações	Informação e educação	Não estrutural
	Preparativos em caso de desastres	Não estrutural
	Medidas de recuperação pós-inundação	Estrutural
	Seguro contra inundações	Não estrutural

Estratégia	Medidas	Classificação
Preservação dos recursos naturais das planícies de inundação	Zoneamento de áreas inundáveis	Não estrutural

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Organização Meteorológica Mundial (2004).

As medidas estruturais são aquelas onde se aplicam soluções da engenharia, executando-se sistemas de micro e macro drenagem, obras de infraestrutura urbana e relocação de moradias. Decerto, com foco de reduzir os riscos devido à ocorrência das inundações, inúmeras podem ser as obras interventivas, sendo essas, tipos de soluções estruturais (KRÜGER; DZIEDZIC, 2014).

Tucci (1993) classifica as medidas estruturais em intensivas e extensivas. As soluções extensivas são as que agem na bacia, modificando as relações entre a precipitação e a vazão, como, por exemplo, a alteração da cobertura vegetal da bacia, que reduz os picos das cheias e o volume de escoamento superficial. Já as intensivas são as que agem no rio e são agrupadas em três subgrupos, aceleração do escoamento (canalização, cortes de meandros), retardamento do escoamento (construção de reservatórios ou bacias de amortecimento) e desvio do escoamento (canais ou desvios).

Já as medidas não estruturais são referentes às ações de políticas direcionadas ao planejamento de uso do solo, gestão do zoneamento, educação ambiental e planos de defesa civil. São condutas que se propõem a reduzir os danos pela melhor convivência da população com as inundações. De fato, por apresentarem características reguladoras, minimizam os impactos causados a um menor custo, bem como se destacam pela relativa facilidade de implementação (KOBİYAMA *et al.*, 2006).

Dentre as intervenções não estruturais mais difundidas, destaca-se o mapeamento de áreas inundáveis, uma alternativa viável financeiramente e útil nos estudos de riscos, pois, além de possibilitar a aplicação em municípios com poucos recursos, visam também suprir uma das maiores deficiências relacionadas aos desastres hidrológicos no Brasil, que é a escassez de sistemas de alerta em escala local (KOBİYAMA *et al.*, 2006, KOBİYAMA; GOERL, 2007).

Com o intuito de auxiliar a leitura e compreensão de eventos hídricos extremos, o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações é uma ferramenta complementar aos

meios de gestão e planejamento, corroborando, desse modo, com a mitigação de danos sociais e materiais. De fato, esse tipo de intervenção se estabelece como elemento fundamental para definição de medidas não estruturais, com o propósito de favorecer o gerenciamento do uso e ocupação do solo, os planos de defesa civil e o direcionamento das expansões urbanas (FRANK; PINHEIRO, 2003).

Ratificando, desse modo, a relevância da técnica, Marcelino *et al.* (2006) argumentam que um dos instrumentos de análise de risco mais eficiente é o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação, pois, a partir destes mapas é possível elaborar medidas preventivas, planificar as situações de emergência e estabelecer ações conjuntas entre a comunidade e o poder público, com o propósito de promover a defesa permanente contra os desastres naturais.

Posto isto, um passo significativo em face da defesa permanente contra os desastres naturais foi instaurado pela Lei Federal de Proteção da Defesa Civil nº 12.608, de 10 de abril de 2012, a qual determina que os municípios devam acrescentar ao seu Plano Diretor, o mapeamento das áreas suscetíveis à ocorrência de desastres naturais, regulamentando a ocupação de áreas desfavoráveis a ocupação, bem como a elaboração de planos de contingência a redução de riscos (BRASIL, 2012).

De modo geral, a metodologia apresentada indica a localização de áreas onde existe a probabilidade de ocorrência de desastres, possibilitando o planejamento e execução de medidas que evitem ou reduzam os impactos negativos causados por eventos hídricos extremos (ECKHARDT, 2008; GOERL; KOBIYAMA; PELLERIN, 2012; HORA, 2009; SAUERESSIG, 2012; TUCCI, 2007; UFSC, 2020).

Compreendidas as contribuições, Andjelkovic (2001) menciona que dentre os benefícios supracitados pela elaboração do zoneamento de áreas inundáveis, há também a possibilidade de consulta à base de dados produzida para auxiliar a implantação de intervenções estruturais, gerando, dessa forma, uma combinação coordenada entre ações. Desse modo, é essencial a existência de informações sistematizadas para subsidiar a previsão e o controle de processos naturais ou induzidos pelo homem nas bacias hidrográficas (MENDES; CIRILO, 2001).

Decerto, não é possível controlar o aumento do número de ocorrências de eventos extremos, entretanto, medidas preventivas e mitigadoras devem se tornar mais eficazes e acessíveis, com o intuito de atenuar os danos e o número de pessoas lesadas. Para isto, análises elaboradas das estratégias a serem adotadas e das

condições ambientais do local de estudo são fundamentais para se chegar à melhor e mais eficiente técnica de minimização do desastre natural (BINNS, 2020).

2.1.2 Técnicas de mitigação dos danos

Um dos maiores desafios a serem enfrentados pelo poder público é antecipar os impactos gerados pela ocupação desordenada do espaço urbano antes que eles sejam realidade. De fato, é extremamente penoso evitar um desastre natural, entretanto, é possível reduzi-lo e mitigá-lo, de modo a amenizar os prejuízos e os impactos causados.

Para esse fim, em análises dos dois tipos de medidas interventivas, Monte *et al.* (2016) identificou que o uso de ferramentas não estruturais é, por vezes, mais viável financeiramente, ao passo que consegue representar os processos e elaborar prognósticos de modo satisfatório. Nesse cenário, no tocante ao zoneamento de áreas inundáveis, Monteiro e Kobiyama (2013) destacam a existência de duas metodologias distintas, a modelagem hidrodinâmica e a reconstituição de manchas a partir de dados observados *in loco*, ambas com o intuito de apontar uma representação simulada da realidade e auxiliar o entendimento dos processos que a envolvem.

A modelagem hidrodinâmica baseia-se fundamentalmente nas equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento, conhecidas como Equações de *Saint-Venant*. Em sua forma completa ou simplificada, podem representar escoamentos em rios naturais ou canalizados, condutos, reservatórios, entre outras estruturas hidráulicas. Traduzindo, dessa forma, a dinâmica do escoamento da água sobre as superfícies que compõem a bacia hidrográfica, seja ela natural ou modificada pela ação antrópica.

A classificação dos modelos hidrodinâmicos é realizada conforme o grau de simplificação introduzido na equação de conservação da quantidade de movimento, ou seja, de acordo com o número e tipo dos termos considerados (BAPTISTA *et al.*, 2003). Logo, os modelos que resolvem as equações em sua forma completa são chamados de hidrodinâmicos completos, podendo representar com precisão os fenômenos mais importantes do escoamento em canais.

O Quadro 3 apresenta a categorização dos modelos hidrodinâmicos de acordo com a inclusão dos termos na equação da conservação da quantidade de movimento.

Quadro 3 - Síntese de tipologia de modelos hidrodinâmicos.

Tipo do modelo hidrodinâmico	Nome	Termos da equação dinâmica
Simplificado	Onda Cinemática	Considera apenas os termos referente a gravidade e ao atrito
Simplificado	Analogia à Difusão	Considera os termos de pressão, gravidade e atrito
Completo	Hidrodinâmico Completo	Considera contribuição dos termos de inércia, pressão, gravidade e atrito

Fonte: A Autora (2023).

Nota: Adaptado de Vidal (2012).

Entretanto, as equações da hidrodinâmica fluvial não são consideradas triviais, devido à presença de termos não lineares, com solução analítica possível apenas para a representação de problemas bastante simplificados. À vista disso, a utilização de métodos numéricos, com aplicação de técnicas de discretização do domínio, tornou-se recorrente para a busca de solução das equações hidrodinâmicas, dentre os quais destacam-se o método das características, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos (BAPTISTA *et al.*, 2003; PORTO, 1998; RIGUETTO, 1998; TUCCI, 2005).

Tradicionalmente, utilizam-se os modelos hidrodinâmicos para o mapeamento de áreas de inundação, os quais requerem dados hidrológicos (chuva e vazão) e topográficos (seção do canal e topografia da planície de inundação) (GALI *et al.*, 2007; MONTEIRO; KOBİYAMA, 2013). Todavia, a realidade brasileira, principalmente para bacias menores e longe de grandes centros urbanos, é de ausência de dados com resolução temporal desejada para aplicação dos modelos hidrodinâmicos clássicos. Além do mais, a complexidade inerente à operação, a demanda computacional, bem como a limitação em aquisição de dados para bacias de menor porte, apresentam-se com fatores adversos à metodologia.

Em uma abordagem distinta, Kobiyama *et al.* (2006) apontam como uma alternativa simplificada, a reconstituição de manchas de inundação a partir de dados coletados *in loco*, classificada pelos autores como metodologia de base empírica. Essa técnica fundamenta-se no mapeamento em campo dos locais atingidos em eventos extremos, incluindo o levantamento da altura da lâmina d'água em um conjunto de pontos, permitindo, assim, a delimitação da mancha de inundação em

base cartográfica analógica (impressa) ou de forma digital (*Geographic Information System* - GIS).

Desse modo, dada a capacidade de armazenamento e análise de informações geográficas, o geoprocessamento surge como um recurso dinâmico que amplia as alternativas de mapeamento e análise espacial de dados. O método compreende a realização de levantamentos, análises e cruzamentos de informações georreferenciadas, objetivando o planejamento e a gestão de um espaço específico, apoiando-se na cartografia digital para a manipulação de dados (FITZ, 2000).

Assim, a introdução das geotecnologias e das técnicas de geoprocessamento beneficiaram os estudos com o intuito de espacializar as áreas inundáveis e os comportamentos hidrológicos, ao passo que impulsionaram a criação de cenários e modelagens hidrológicas (DEGIORGIS *et al.*, 2012; JALAYER *et al.*, 2014; POURALI *et al.*, 2014). Isto é, a inclusão dos métodos tem suprimido lacunas do mapeamento de áreas propensas à inundação, dentre as quais citam-se a obtenção de dados topográficos e a representação detalhada do relevo, fatores importantes ao se determinar a altura e extensão de uma inundação (FEMA, 2009). Com efeito, o uso de geotecnologias fornece informações de síntese para a avaliação de riscos, tomada de decisões e entendimento das causas e consequências de eventos hidrológicos extremos (GILLESPIE *et al.*, 2007; JOYCE *et al.*, 2009; TRALLI *et al.*, 2005).

Em suma, a interrelação entre dados existentes e a elaboração de novos planos de informações, podem identificar e coordenar de forma eficaz os eventos hidrológicos, fornecendo prognósticos de inundações em áreas já urbanizadas, além de antecipar a realização de medidas protecionistas e preventivas (RAMOS *et al.*, 2013).

À vista disso, dada a maior disponibilidade de dados topográficos atuais, bem como da melhor qualidade inerente, esse tipo de mapeamento pode ser desenvolvido empregando-se diferentes metodologias e instrumentos de apoio. O Quadro 4 elenca alguns estudos correlatos.

Quadro 4 - Metodologias distintas acerca do uso de dados coletados *in loco*.

Referências	Contribuições
Apel <i>et al.</i> (2009)	Discussão relativa à questão de complexidade do modelo exigido em análises de risco de inundação, utilizando-se, para isso, de metodologias distintas, com base nos dados obtidos em campo durante o evento de 2002, em Eilenburg, Alemanha. Dentre as técnicas selecionadas, as que utilizaram aplicação de dados <i>in loco</i> e geotecnologias mostraram resultados satisfatórios, dada a simplicidade operacional.
Poser e Dransch (2010)	Debate sobre oportunidades e desafios do uso de <i>Volunteered Geographic Information</i> (VGI) para gestão de desastres, com foco particular em informações para as fases de resposta e recuperação. O estudo foi realizado para o evento da bacia do rio Elba em 2002, apresentando resultados satisfatórios de acordo com a literatura correlata.
Chen <i>et al.</i> (2017)	Proposta de avaliação do método <i>Light Detection And Ranging</i> (LiDAR), tecnologia decorrente do sensoriamento remoto, através da classificação dos pontos de observação de superfície inundada e auxílio do MDT para gerar mapas de profundidade de inundação durante o evento de Iowa, EUA. O resultado foi avaliado usando medições extraídas de imagens <i>Small Programmable Object Technology</i> (SPOT) e a consistência entre as duas áreas inundadas derivadas de imagens LiDAR e SPOT foi de 72%.
Scorzini, Radice e Molinari (2018)	Submissão de ferramentas rápidas para a previsão de distribuição espacial das profundidades de inundação em áreas com déficit de dados. O modelo RAPIDE constitui-se numa ferramenta baseada em GIS que realiza interpolações espaciais com os níveis de água coletados e depende apenas do perímetro inundado e um Modelo Digital do Terreno (MDT). O método foi validado com dados da inundação de 2002 em Lodi, Itália.
Afzal <i>et al.</i> (2022)	Descrição de um modelo que integra imagens de satélites (Landsat e MODIS), modelagem hidrodinâmica e dados coletados <i>in loco</i> para prever áreas de inundação na bacia hidrográfica do rio Indus, Paquistão. O resultado avaliado conclui que o modelo pode ser útil para o alerta precoce de enchentes se devidamente calibrado e validado nas grandes bacias hidrográficas que possuem condições hidrometeorológicas extremas e o topográficas complexas.

Referências	Contribuições
Escobar-Silva <i>et al.</i> (2023)	Análise acerca do desempenho do modelo hidrodinâmico HEC-RAS para a avaliação da extensão das áreas inundáveis na região metropolitana sul de São Paulo, utilizando MDT com diferentes resoluções espaciais, além de dados informados pela defesa civil para calibração e validação do modelo. De modo geral, a metodologia mostrou-se uma ferramenta relevante na identificação de áreas susceptíveis a inundações urbanas.
Guirro e Michel (2023)	Reconstituição hidrológica e hidrodinâmica de um evento de inundação ocorrida no sul do Brasil em 2017, usando modelagem e dados coletados <i>in loco</i> para simular diferentes cenários de chuva, com o intuito de avaliar os aspectos determinantes ao evento.

Fonte: A Autora (2023).

De fato, em comparação com modelos mais robustos e métodos de análise multicritério, é possível observar que a metodologia de base empírica é mais simplificada e pode ser facilmente replicada para a reconstituição de eventos ocorridos. Entretanto, ainda assim, é necessário considerar disponibilidade de equipamentos para a realização dos levantamentos em campo, como receptores *Global Navigation Satellite System* (GNSS), estação total, e demais ferramentas que permitam a coleta de dados de forma georreferenciada, além de corpo técnico capacitado para a sua operação.

Ante ao exposto, o aprimoramento e popularização dos dispositivos móveis têm possibilitado o desenvolvimento de aplicações voltadas para fins técnicos e científicos, sendo empregues para as mais diversas finalidades, dentre as quais destacam-se as direcionadas à engenharia.

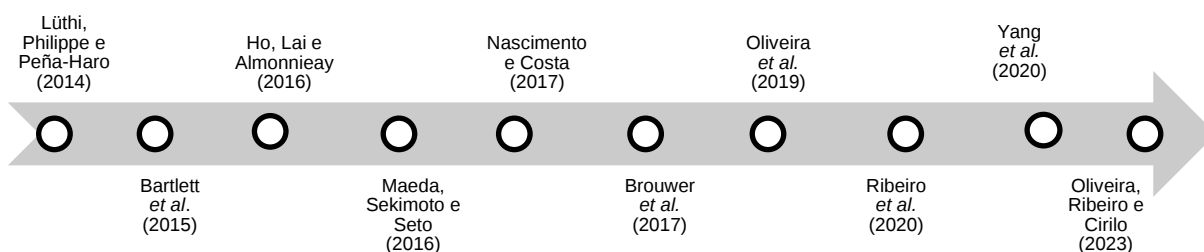
2.2 APLICAÇÃO DE SMARTPHONES NA ENGENHARIA

O alcance dos dispositivos móveis é crescente em todo o mundo, com frequência, os aparelhos são utilizados tanto na vida pessoal quanto na profissional. De fato, os avanços na tecnologia móvel levaram ao desenvolvimento dos *smartphones*, uma nova classe de aparelhos com funcionalidades mais avançadas de conectividade, que rapidamente se tornaram sinônimo da modernidade. Posto isto, boa parte desses dispositivos está equipado com capacidade de processamento

relativamente avançada, um sistema de posicionamento global e sensores de movimento (DEL ROSARIO *et al.*, 2015).

Com acurácia posicional planimétrica que pode variar entre 5 e 20 metros, os *smartphones* apresentam-se como uma alternativa para a realização de levantamentos em campo de informações georreferenciadas (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Decerto, além de apresentar desempenho semelhante, ou até mesmo superior, aos receptores GNSS de navegação, a sua operação não demanda conhecimentos técnicos específicos, e é atualmente uma ferramenta disponível para 84,4% da população brasileira (IBGE, 2021). Destarte, o Gráfico 3 elenca alguns estudos que realçam as multifuncionalidades dos dispositivos móveis, voltadas a distintas áreas de aplicação.

Gráfico 3 - Aplicação de dispositivos móveis voltada para fins técnicos e científicos.



Fonte: A Autora (2023).

Dadas as funcionalidades, Lüthi, Philippe e Peña-Haro (2014) propuseram uma ferramenta para dispositivos móveis capaz de calcular o fluxo de escoamento em canais abertos, com análise realizada através de uma sequência de filmes gravadas pelo próprio dispositivo. Logo, o método tem o intuito de favorecer uma gestão eficaz da água, principalmente na agricultura irrigada, configurando-se, desse modo, como um mecanismo eficiente e de baixo custo agregado. De modo similar, Bartlett *et al.* (2015) desenvolveram uma aplicação que permite aos usuários a visualização rápida do déficit de umidade do solo, bem como das medições do clima e da capacidade de inserção hídrica, ambos com a expectativa de propor o uso racional dos recursos hídricos.

Em uma abordagem distinta, Ho, Lai e Almonnieay (2016) apresentaram uma ferramenta, utilizando GIS em associação com dados de vibrações baseadas em *smartphones*, destinada à coleta de dados de infraestrutura de pavimentos, a fim de elaborar planos estratégicos e cronogramas de manutenção e reabilitação.

Atenuando, desse modo, a mobilização de técnicos para avaliação de rodovias, como previsto tradicionalmente. No mesmo âmbito, Maeda, Sekimoto e Seto (2016) lançaram uma aplicação para *smartphones*, apoiada nos conceitos de redes neurais, para avaliar o status de danos em rodovias usando apenas fotografias da estrada. Decerto, o método proposto apresenta-se como contribuinte aos governos locais que carecem de técnicos e gestores especializados.

Destarte, ante a pluralidade de recursos, Nascimento e Costa (2017) enxergaram os dispositivos móveis como uma ferramenta capaz de auxiliar a identificação de pontos de alagamentos, através de uma aplicação apoiada no conceito de mapeamento colaborativo. Com efeito, os resultados da avaliação apontaram a relevância das contribuições, evidenciando que a atuação da comunidade auxilia na disseminação de conhecimentos relevantes à população.

Aliado ao conceito de mapeamento colaborativo, Brouwer *et al.* (2017) investigam a aplicabilidade do uso de conteúdo de mídias sociais para desenvolvimento de mapas de inundação. Em suma, concluiu-se que embora os mapas tendam a superestimar a extensão de área inundável, dados inerentes de mídias sociais podem ser usados para derivar informações sobre inundações.

De modo análogo, com o intuito de avaliar os produtos obtidos pelo aplicativo Hidromapp, fornecedor de dados acerca de eventos de inundação, Oliveira *et al.* (2019) mensuraram a qualidade de posicionamento obtida por sensores de localização acoplados em *smartphones*, abordando, desse modo, o desempenho da ferramenta para a coleta de VGI. Como resultado, verificou-se uma variação de acurácia posicional planimétrica segura, conforme literatura correlata, ratificando, assim, a performance satisfatória da aplicação ante a representação de processos e elaboração de prognósticos.

Compreendido o potencial do aplicativo Hidromapp, Ribeiro *et al.* (2020) investigaram a sua aplicabilidade como ferramenta de suporte técnico para coleta georreferenciada de marcas de inundação, a partir de dados coletados via *smartphones*. Em forma de estudo de caso, buscou-se uma alternativa ao mapeamento de áreas inundáveis para regiões com capacidade técnica e recursos insuficientes. Destarte, ante aos resultados obtidos, a metodologia proposta apresentou bom desempenho, dispondo, desse modo, o Hidromapp como ferramenta acessível e de cunho técnico para coleta de dados em campo.

Isto posto, Yang *et al.* (2020) propôs um método em tempo real, barato e portátil para medir as velocidades de superfície da água, no qual um sistema de *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) foi desenvolvido usando um dispositivo de *smartphone*. De modo simplificado, o método determina a velocidade medindo o deslocamento de imagens de partículas em um período de tempo conhecido, logo, a velocidade é calculada dividindo a distância entre os pares de partículas pelo intervalo de tempo.

Por conseguinte, Oliveira, Ribeiro e Cirilo (2023), motivados pelas múltiplas incertezas no processo de modelagem, em particular ao que se refere à calibração e validação, exploraram dados espaciais colaborativos como alternativa para modelos hidrodinâmicos, especificamente no que diz respeito ao mapeamento de risco de inundação. Desse modo, aspectos como o desenvolvimento de uma plataforma colaborativa; identificação de estratégias para motivar e engajar os colaboradores; e ferramentas para a avaliação da consistência dos dados foram desenvolvidos.

De fato, a tecnologia inerente aos *smartphones* propiciou o seu uso dentre os mais diversos campos de atuação. Logo, dado o alcance e popularidade, tornou-se factível a ascensão dos dispositivos móveis como ferramenta de cunho técnico e científico a baixo custo.

2.2.1 O aplicativo Hidromapp

Idealizado por Oliveira (2017) e inicialmente denominado Hidromapa, o protótipo foi concebido, a priori, para ser utilizado por estudantes de ensino médio, voltado para a coleta de informações georreferenciadas sobre pontos atingidos por inundações e respectivas cotas, danos e prejuízos causados, e informações social nos locais afetados.

Avaliado através de um estudo de caso, por um grupo composto de 37 usuários, constatou-se a necessidade de ajustes no aplicativo para garantia de seu funcionamento adequado, dentre as quais citam-se as ações prioritárias: migração da estrutura do protótipo, construído como sistema *web* para um sistema autônomo, que independe de *internet* para sua utilização; aprimoramento das funcionalidade voltadas à coleta de informações sobre cotas de inundação; redução do número de informações fornecidas pelo usuário; implementação de recursos de geocodificação de endereços para todo o Brasil; implementação de funções de envio fotografias do

eventos e; adição de funcionalidades para cadastros de usuários e *ranking* de colaboradores (OLIVEIRA; CIRILO; RIBEIRO, 2018).

Enquanto a primeira versão do aplicativo tinha como intuito a coleta de dados para a elaboração de mapas preliminares de riscos hidrológicos (intensidade, danos e vulnerabilidade), a versão aprimorada, o Hidromapp, buscou a coleta de informações de suporte para a modelagem de áreas inundáveis, posto que essa é umas das principais lacunas existentes. Desse modo, no ciclo mais recente de desenvolvimento, a plataforma foi idealizada considerando a alteração de sua finalidade e a resolução de problemas identificados no protótipo, como supracitado.

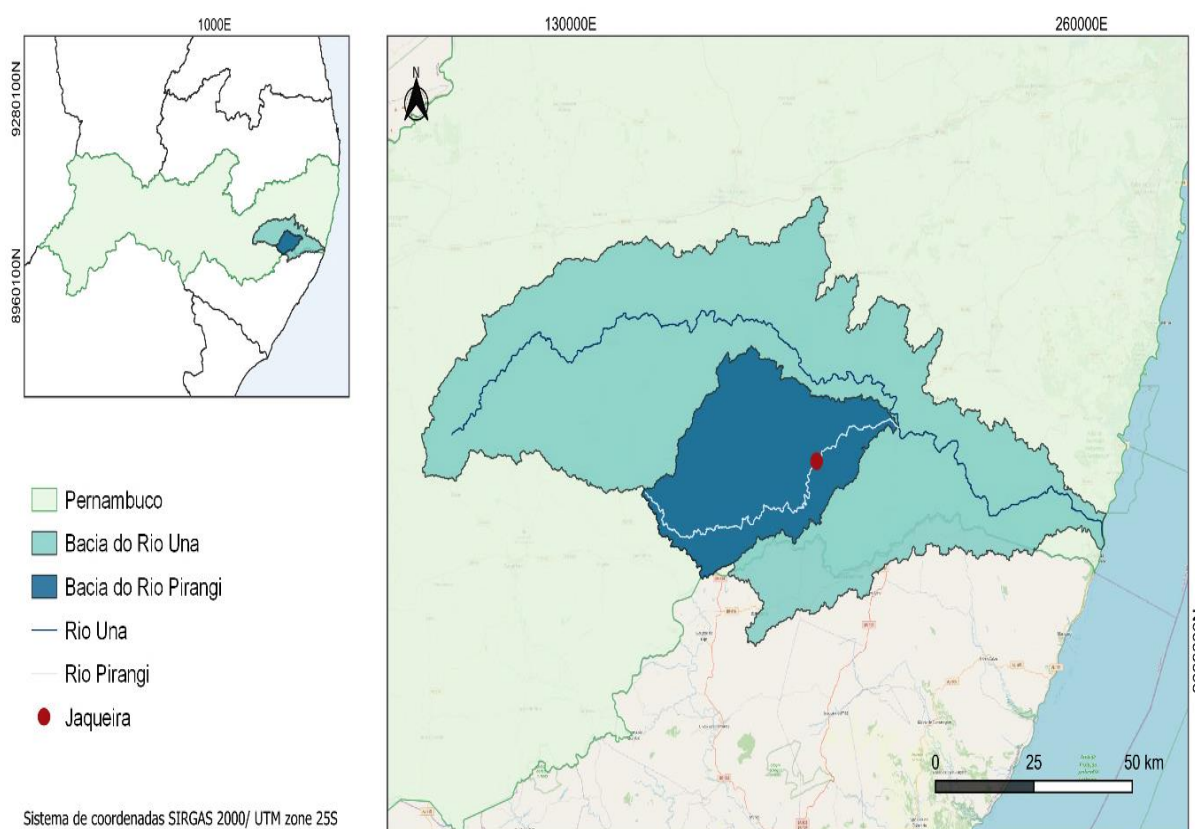
Com efeito, ante aos refinamentos realizados, o aplicativo fundamenta-se como aliado ao registro e armazenamento georreferenciados de dados acerca de eventos hidrológicos extremos. Testado inicialmente apenas como ferramenta VGI, a aplicação apresenta potencial para tornar-se uma ferramenta de cunho técnico e científico em face da defesa contra os desastres naturais.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO E EVENTO RECONSTITUÍDO

Os estudos realizados contemplam a área urbana do município de Jaqueira, localizado na Zona da Mata Sul do Estado de Pernambuco. Também conhecida como princesa do Pirangi, possui uma área de 87,208 km² e uma população estimada em 10.720 habitantes, dentre as quais 38,4% habitam a zona rural e 61,6% a urbana (IBGE, 2022). O município está situado na bacia hidrográfica do rio Una, cuja sede municipal situa-se às margens do rio Pirangi, um dos principais afluentes da bacia (Mapa 1).

Mapa 1 - Localização do município de Jaqueira na Bacia do Rio Una.



Fonte: A Autora (2023).

No estado de Pernambuco, a bacia do rio Una é conhecida por registros de desastres hidrológicos ocorridos ao longo dos anos, sendo atualmente monitorada pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC) e pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). À vista disso, em

consequência de uma rigorosa temporada de chuvas, Pernambuco enfrentou, em 2010, a maior inundação já catalogada. Com perdas e danos significativos, o evento registrou um montante estimado em R\$ 3,4 bilhões, concentrados principalmente no setor social. No âmbito habitacional, houve relatos de destruição de mais de 16 mil casas populares, com prejuízos estimados em R\$ 2 bilhões, equivalente a 62% do custo total do desastre. Não obstante, os setores de educação e saúde sofreram perdas avaliadas em R\$ 286,5 milhões e R\$ 145,5 milhões, respectivamente. Com efeito, o padrão mostrado sugere uma concentração do impacto sobre a população de baixa renda e sobre o setor público (BANCO MUNDIAL, 2012).

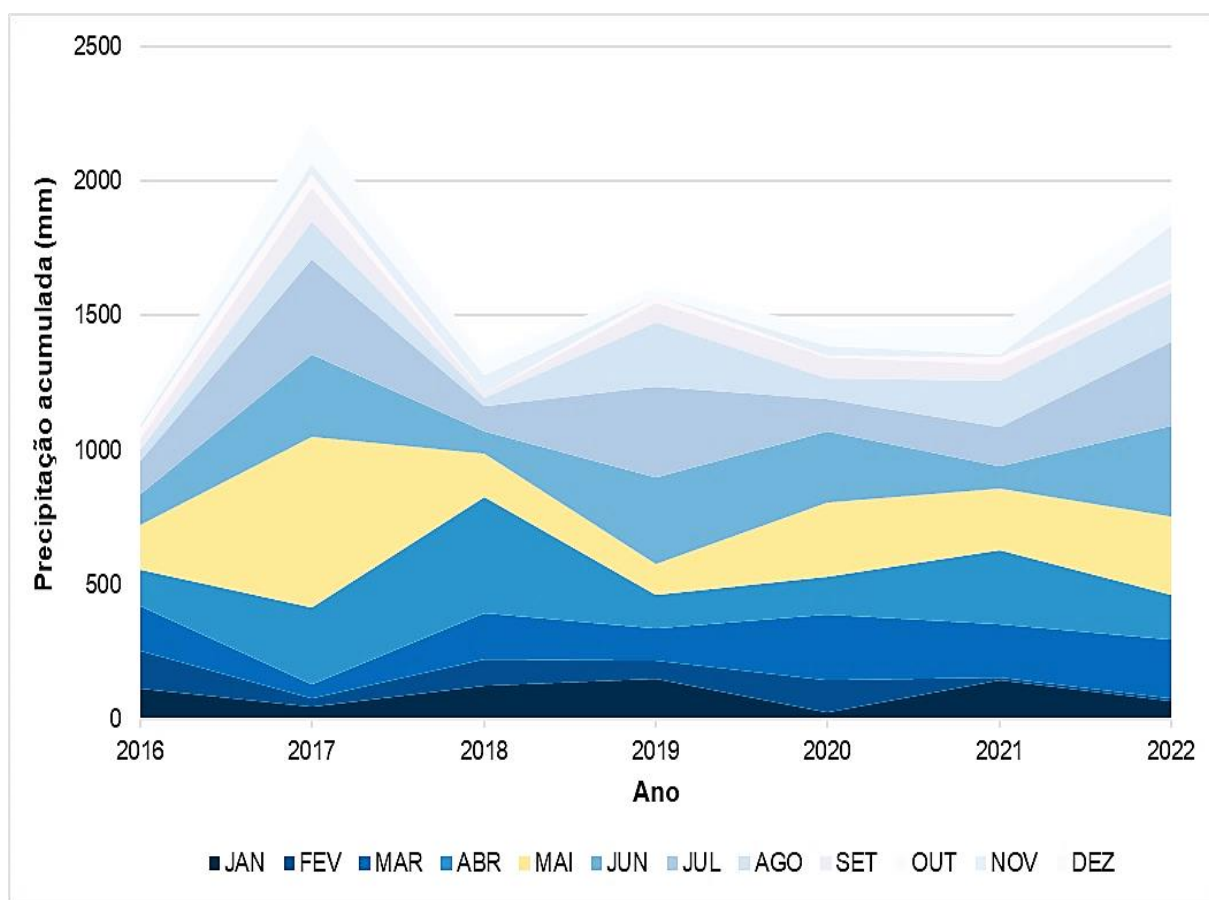
Posto isto, compreendida a situação relativa ao cenário pós-evento, dentre os municípios afetados 42 decretaram estado de calamidade pública ou situação de emergência, saldo que trouxe à tona os destroços de casas, hospitais, prédios da administração pública, escolas, estabelecimentos comerciais e de obras de infraestrutura em geral. Decerto, as inundações na região abrangem o principal rio da bacia (Una), todavia os seus afluentes e cidades limítrofes são também fortemente afetadas, tais como o rio Pirangi e a sede municipal de Jaqueira, respectivamente.

Com efeito, desde 2010, em decorrência do maior desastre hidrológico registrado na região, diversos estudos sobre o tema foram desenvolvidos, como em Machado *et al.* (2012), Alves, Cavalcanti e Nóbrega (2013), Cavalcanti, Tavares Junior, e Candeias (2013), Dantas *et al.* (2014), Monteiro *et al.* (2014), Londe *et al.* (2015), Ribeiro Neto *et al.* (2015), Amorim e Silva (2016), Oliveira e Silva (2016), Pereira *et al.* (2017), Oliveira, Ribeiro e Cirilo (2023), dentre outros. Logo, dado o volume de trabalhos científicos realizados, torna-se notório a magnitude dos eventos ocorridos na região, como também a relevância de novas contribuições para a gestão de riscos hidrológicos na bacia do rio Una.

Reiterando o cenário caótico, a região da Zona da Mata Sul de Pernambuco voltou a ser acometida por um desastre de natureza hídrica. De modo análogo, em meados de 2017, as inundações impactaram a infraestrutura física das cidades, resultando em aproximadamente 3,3 mil desabrigados e 36 mil desalojados nas cidades que decretaram estado de emergência. Nesse evento, mais de 5 mil casas foram danificadas e cerca de 250 destruídas. Ademais, estradas vicinais, rodovias, pontilhões, bueiros e estruturas de serviços básico foram direta ou indiretamente afetadas (CREA-PE, 2017).

Diante da conjuntura, as fortes chuvas que se abateram sobre a região foram causadas pela confluência e intensificação de ventos úmidos nos baixos níveis da atmosfera, desde o oceano até a costa de Pernambuco, aumentando o transporte de umidade do oceano para o continente, entre a Zona da Mata e o Agreste. À vista disso, o Gráfico 4 ilustra o regime pluviométrico irregular de 2017 em comparação com demais séries anuais para o município de Jaqueira, o objeto de estudo.

Gráfico 4 - Regime pluviométrico anual para o município de Jaqueira-PE.



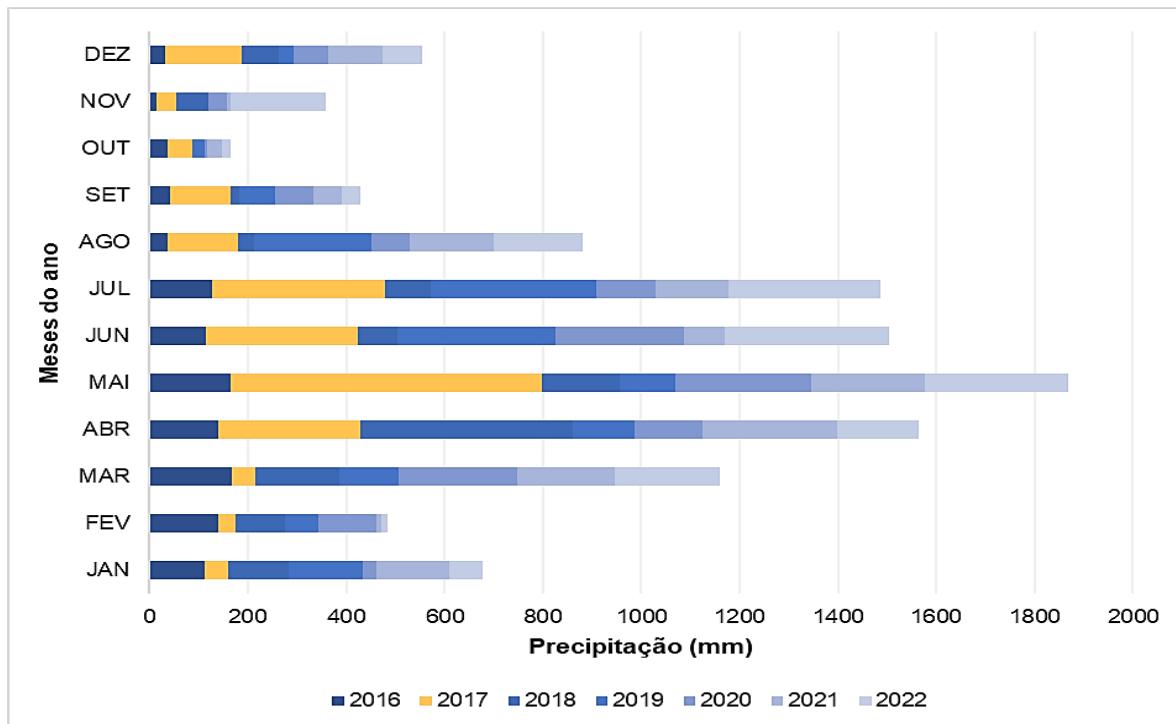
Fonte: APAC (2023).

Com o período de quadra chuvosa compreendido entre abril e julho, o município registrou em maio, mês do desastre hídrico, um volume precipitado equivalente a 632 mm, mais que o triplo do quantitativo esperado para esse intervalo (Gráfico 5).

Em suma, entre os dias 25 e 31 de maio foi registrado em Jaqueira uma precipitação total acumulada de 336 mm, que somado às chuvas ocorridas à montante, acarretou no aumento das vazões do rio Pirangi e no seu transbordamento, afetando 1.200 moradores no município, isto é, aproximadamente 10% da sua população total, com os reflexos representados na Fotografia 1, de fato, ao longo dos

últimos vinte anos, as inundações bruscas foram os eventos extremos que mais desabrigaram, feriram e mataram a população pernambucana (CEXCHUV, 2017).

Gráfico 5 - Regime pluviométrico mensal para o município de Jaqueira-PE.



Fonte: APAC (2023).

Fotografia 1 - Impactos da inundação ocorrida em maio de 2017 em Jaqueira-PE.



Fonte: A Autora (2017).

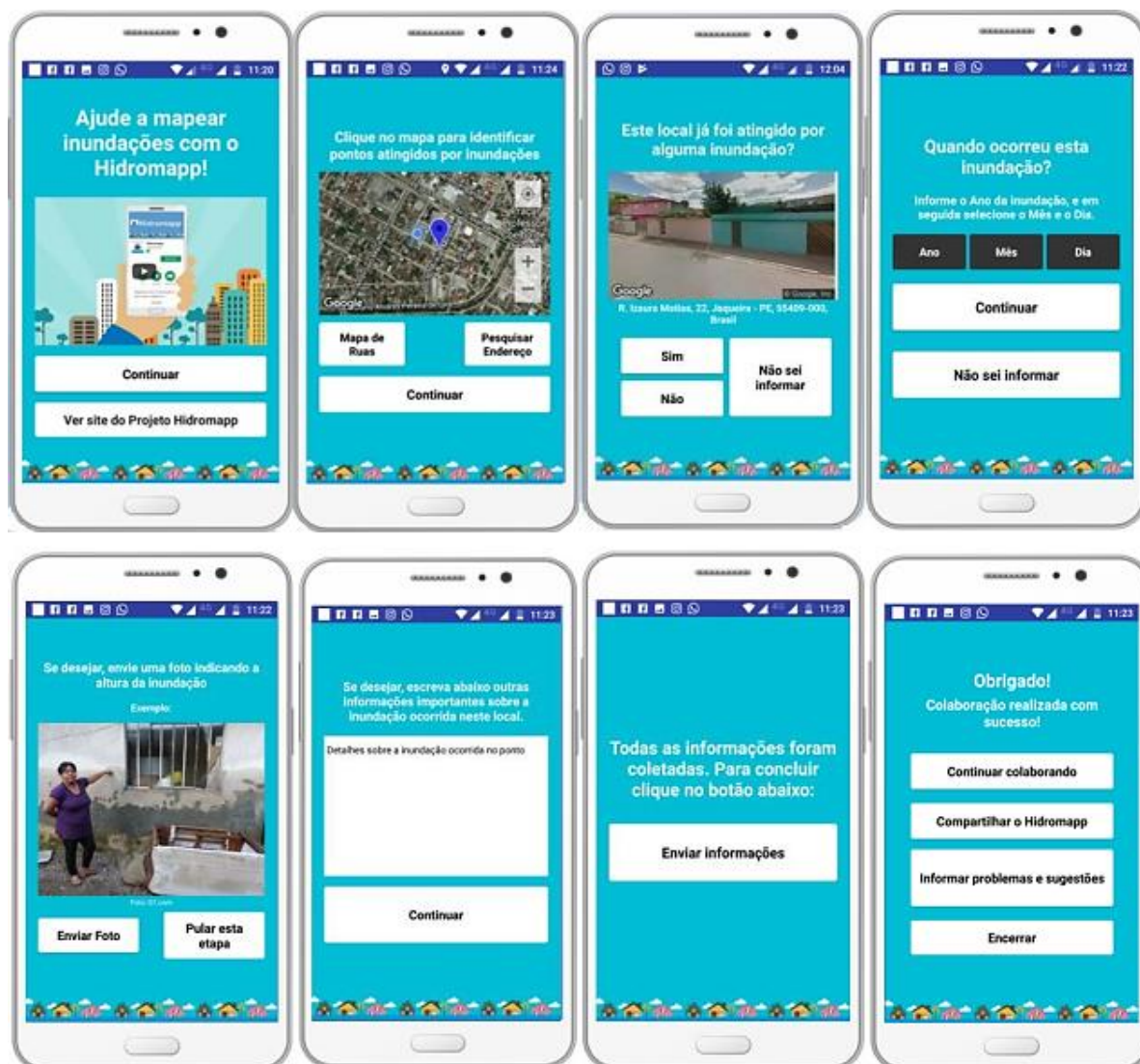
Todavia, apesar do desastre ocorrido em 2010 ser considerado o de maior impacto já registrado na bacia do Una, o evento de 2017 foi selecionado para o estudo de caso por ser mais recente, facilitando o processo de aquisição de dados em campo (marcas da inundação nos imóveis e entrevistas com os moradores), além de também ser considerado um evento de desastre hídrico de alto impacto.

3.2 COLETA DE DADOS COM SMARTPHONES

Conforme constatado por Oliveira *et al.* (2019), sensores de localização acoplados em *smartphones* apresentam acurácia posicional planimétrica adequada para aplicações compatíveis com receptores GNSS de navegação. Entretanto a acurácia posicional planimétrica em *smartphones* pode sofrer interferência das condições de levantamento, como a presença de obstáculos físicos, e das características e configurações dos dispositivos utilizados.

Para a coleta de dados com *smartphones* foi utilizado o aplicativo Hidromapp (Figura 2), que consiste numa aplicação *mobile* em que os usuários podem coletar e enviar informações sobre inundações já ocorridas. Logo, com o aplicativo é possível informar pontos afetados e altura da lâmina d'água, ano das ocorrências, fotos e informações complementares em formato de mensagem de texto (OLIVEIRA; CIRILO; RIBEIRO, 2018).

Figura 2 - Representação da interface do aplicativo Hidromapp dentre as etapas de coleta de dados.



Fonte: A Autora (2023).

Na plataforma, o georreferenciamento das informações coletadas pode ser realizado de forma automática, através do sistema GPS integrado ao *smartphone*, ou pela função “apontar no mapa”, a qual possibilita que o colaborador contribua mesmo estando afastado do local atingido.

Os dados coletados com o aplicativo Hidromapp são enviados automaticamente para o banco de dados do projeto. Caso não haja conexão com a internet no momento da coleta, as informações permanecem salvas no dispositivo e são enviadas para o banco de dados assim que a conexão seja reestabelecida. Com a coleta finalizada, as informações podem ser visualizadas no site do projeto (<http://www.hidromapp.com.br>) ou solicitadas por *e-mail*, em formato *shapefile*.

O Hidromapp pode ser instalado gratuitamente através da plataforma *Google Play Store*, compatível com dispositivos *Android*. Em campo, a altura da lâmina d'água nos pontos coletados foi medida através de fita métrica, com o intuito de promover acurácia ao levantamento.

Como já mencionado, a metodologia de base empírica para a reconstituição de manchas de inundação baseia-se no mapeamento *in loco* de pontos afetados pelo evento, até que toda a extensão da área atingida possa ser delimitada em base cartográfica (KOBİYAMA *et al.*, 2006). Dessa forma, buscou-se mapear em campo os pontos localizados nos limites (borda) da área afetada pela inundação ocorrida em 2017, bem como os locais onde a lâmina d'água atingiu maiores profundidades.

Os dados obtidos em campo, acerca do histórico de inundação, foram subsidiados através de entrevistas com a população afetada. Na abordagem populacional questionou-se a profundidade registrada durante o evento em estudo, com o objetivo de mensurar e notificar a altura observada em cada ponto. Ademais, foram georreferenciadas as marcas de inundação ainda presentes nos imóveis, buscando complementar as informações das entrevistas (Fotografia 10).

Fotografia 2 - Registros da coleta de marcas de inundação em Jaqueira - PE.



Fonte: A Autora (2017).

Ao todo foram levantados 130 pontos referentes à inundação ocorrida na cidade de Jaqueira em maio de 2017, sendo 95 pontos coletados pelo GPS do celular e 35 pontos coletados através da função “apontar no mapa”. Os pontos obtidos

incluíram locais diretamente afetados pelo evento e pontos que se situavam nas bordas da área inundada (Mapa 2).

Mapa 2 - Pontos coletados com o aplicativo Hidromapp em Jaqueira - PE.



Fonte: A Autora (2023).

Por fim, considerando que o aplicativo Hidromapp foi concebido como uma plataforma colaborativa em que os dados são fornecidos pela própria população, neste trabalho pretende-se abordar especificamente a sua utilização como ferramenta técnica de suporte para engenheiros, agentes de defesa e proteção civil e demais profissionais que atuam na gestão de riscos e desastres hidrológicos.

3.3 VERIFICAÇÃO E AJUSTE DOS PONTOS COLETADOS

Após à coleta, em ambiente GIS (*software* QGIS 3.10.12) foi realizada a verificação e ajuste dos pontos, considerando a possibilidade de erros no posicionamento pelo receptor GNSS do *smartphone* utilizado. Esta etapa se faz necessária tendo em vista que desvios no posicionamento planimétrico podem acarretar em distorções consideráveis na estimativa da cota de inundação, sobretudo em locais de declividade acentuada. Desse modo, com auxílio da ferramenta *Google*

Street View, recurso que disponibiliza vistas panorâmicas, e das fotos registradas em cada ponto levantado, foi possível verificar e ajustar a posição de informações que apresentaram erros de localização.

3.4 RECONSTITUIÇÃO DA MANCHA INUNDADA

A reconstituição autêntica de um desastre requer dados contínuos em toda a extensão de área atingida. À vista disso, levantamentos de dados em campo, contribuindo como agentes pontuais, tornam-se insuficientes para simular a dimensão do evento. Nesse contexto, com o intuito de construir e projetar novos conjuntos de informações a partir de dados singulares obtidos de uma amostragem consistente, utilizam-se métodos de interpolação espacial de dados.

3.4.1 Interpolação espacial

Os métodos de interpolação são ferramentas utilizadas usualmente para gerar superfícies distribuídas de uma determinada variável a partir de dados pontuais, com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial de um determinado atributo. Baseiam-se em dados amostrais situados numa localidade de interesse (JIMENEZ; DOMEQ, 2008). De modo análogo, de acordo com Andriotti (2003), a interpolação é um método pelo qual se estimam valores de uma variável em uma região interior aos pontos de amostragem disponíveis, permitindo representar em mapas, de forma espacialmente contínua, o comportamento de variáveis amostradas pontualmente.

Todavia, não existe, na literatura, um procedimento que se sobressaia ao outro. Assim, deve-se determinar o melhor método para cada circunstância (LENNON; TUNNER, 1995). No mais, a escolha da metodologia adequada busca um produto que se ajuste aos dados com um nível de precisão determinado, apresentando uma superfície contínua e suave, com possibilidade de aplicação a todas as configurações e padrões de densidade dos dados.

Com efeito, o estudo buscou investigar a adaptabilidade de interpoladores legitimados na literatura à base de dados coletadas no levantamento *in loco* do desastre de 2017 em Jaqueira. Isso considerando que as técnicas de interpolação, por apresentarem precisão e agilidade, permitem o desenvolvimento de práticas apropriadas e, até mesmo medidas mitigadoras inclinadas à evolução de ações que

fortaleçam a gestão pública de maneira geral, bem como o gerenciamento dos recursos hídricos em particular.

3.4.1.1 Inverse Distance Weighting (IDW)

O *Inverse Distance Weighting* é um método determinístico para interpolação de dados proposto originalmente por Shepard (1968), e pressupõe que quanto mais distante um local observado estiver do estimado, menor será seu peso, isto é, menor será sua influência sobre o valor interpolado. Sua expressão usual é dada por:

$$F(x, y) = \sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) F(x_k, y_k) \quad (1)$$

Em que $F(x, y)$ é valor interpolado para a coordenada (x, y) , N é o número de pontos observados na vizinhança do local interpolado, $F(x_k, y_k)$ é o valor observado no ponto k e $W(x_k, y_k)$ são os pesos atribuídos a cada uma das localidades. A expressão para determinar a função peso é a seguinte:

$$W(x_k, y_k) = \frac{d_k(x, y)^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_k(x, y)^{-p}} \quad (2)$$

Onde a quantidade $d_k(x, y) = \sqrt{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}$ é a distância entre a coordenada interpolada (x, y) e cada um dos locais observados (x_k, y_k) e $\sum_{k=1}^N W(x_k, y_k) = 1$. Com efeito, ao passo que a distância aumenta, os pesos diminuem potencialmente, do mesmo modo, quando o parâmetro p aumenta, diminui a influência dos pontos mais distantes sobre o interpolado. Inversamente, quanto menor for o valor de p , maior será a influência dos pontos mais próximos.

De fato, o valor adotado pelo parâmetro p assume grande influência sobre os dados interpolados, isto é, se $p = 0$ não há diminuição ou aumento do peso com a distância, pois cada dado terá a mesma influência sobre os interpolados; se $p = 1$, esta é uma simples interpolação linear entre os pontos; se $p = 2$, haverá uma forte influência para pontos mais próximos e uma leve influência para pontos mais distantes (LU; WONG, 2008).

Esse método é caracterizado pelo fato de ser um interpolador exato, desse modo, baseado na sua estrutura, a escolha do peso p pode afetar significativamente

o produto final (CECÍLIO; PRUSKI, 2003; KRAVCHENKO; BULLOCK, 1999; VICENTE-SERRANO; SAZ-SÁNCHEZ; CUADRAT, 2003).

3.4.1.2 Splines

De acordo com Ruggiero e Lopes (1996), o nome *spline* é um termo inglês que deriva de uma ferramenta flexível do desenho técnico, usada em desenhos de engenharia, que pode ser curvada de forma a passar por um dado conjunto de pontos (x_i, x_j) . De modo análogo, o método *spline* de interpolação estima valores usando uma função matemática que minimiza a curvatura, resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada.

Distinto de outros métodos de interpolações polinomiais, o *spline* não utiliza apenas um polinômio de grande ordem para interpolação de todo o conjunto de dados, mas sim divide a série de dados em subconjuntos e utiliza polinômios de pequenas ordens para cada um, usualmente, o grau mais utilizado é o três, *spline* cúbico (EMERY; THOMSON, 1997). A soma ou junção dos polinômios é que forma a interpolação sobre todo o domínio, desse modo, o método calcula os valores a partir de uma função matemática que minimiza a curvatura global da superfície.

O método de interpolação *spline* é muito útil para gerar superfícies com variações delicadas, com leve variação do terreno e suaves transições, como elevação, altura do lençol freático ou concentração de poluição (MATOS, 2008).

3.4.1.2.1 Multilevel B-Spline

Consiste em um estimador determinístico adequado para amostras esparsas, as interpolações são realizadas a partir de uma sequência de funções B-Spline bicúbicas geradas de forma iterativa e baseado na otimização de uma função objetivo (Lee *et al.*, 1997).

O algoritmo faz uso de uma hierarquia de redes de controle, de resoluções mais grossas até mais finas, para gerar uma sequência de funções B-Spline bicúbicas, cuja soma se aproxima da função de interpolação desejada, grandes ganhos de desempenho são realizados usando o refinamento B-spline para reduzir a soma dessas funções em uma função B-Spline equivalente. Logo, sua expressão usual é dada por:

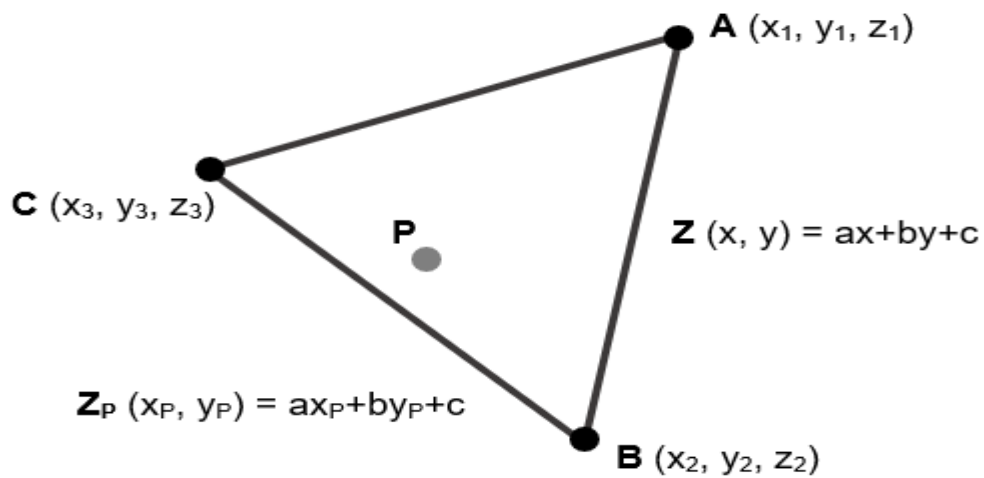
$$f = \sum_{i=1}^j f_i \quad (4)$$

3.4.1.3 Triangulated Irregular Network (TIN)

O método TIN usa o conjunto de dados para formar uma série de triângulos que são contíguos (BURROUGH, 1987). Cada um desses triângulos é um espaço chamado de plano, este plano representa a morfologia da superfície do objeto sob investigação (LEE, 1991; FLORIANI; MAGILLO, 2009; EL-HATTAB, 2014).

Todas as superfícies em forma de triângulo sobre a extensão espacial dos pontos de dados constituem uma superfície completa e contínua. Dentro de cada triângulo, a superfície pode ser expressa por um plano representada a partir dos vértices (Figura 3).

Figura 3 - Metodologia TIN para formação de planos por vértices de triângulos.



Fonte: A Autora (2023).

A elevação de um ponto dentro de um determinado triângulo é determinada pela função linear, isto é, interpolação linear. De modo que os pontos de dados de pesquisa A, B e C são três vértices de um triângulo em um modelo TIN e suas coordenadas são (x₁, y₁, z₁), (x₂, y₂, z₂) e (x₃, y₃, z₃), respectivamente. O ponto P está localizado em um lugar arbitrário dentro do plano e sua elevação pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$Z_P(x_P, y_P) = ax_P + by_P + c \quad (3)$$

A estrutura utiliza modelo topológico de dados vetoriais, em que as coordenadas planialtimétricas são ligadas por linhas, formando um mosaico de triângulos interconectados de tamanhos variados. A partir das coordenadas planialtimétricas é possível gerar diferentes triangulações. Dessa forma, diferentes critérios foram propostos com o objetivo de construir uma triangulação apropriada para interpolações numéricas (CHAVES, 2002).

Uma técnica para minimizar os erros na interpolação consiste em evitar triângulos longos e finos, ou seja, com ângulos agudos. O ideal é que os triângulos sejam o mais equiláteros possível. Solução encontrada na triangulação de *Delaunay* busca maximizar o menor ângulo (PINTO, 1994). Essa triangulação é tão equiângula quanto possível, sendo considerada como padrão para a descrição de superfície.

Com efeito, de acordo com Carmo, Rodrigues e Santos (2015), em regiões onde há pouca variação de declividade da superfície, os pontos amostrados podem ser mais espaçados, enquanto que em áreas de variação mais intensa na declividade o número de pontos amostrados deve ser maior, de forma que a superfície seja representada com fidelidade. Decerto, a rede TIN oferece vantagens na representação de superfícies por apresentar facilidade no cálculo de obtenção de altitudes declividades, orientações, linhas de visada entre pontos, volumes e drenagens (LONGLEY *et al.*, 2013).

3.4.2 Técnicas de geoprocessamento

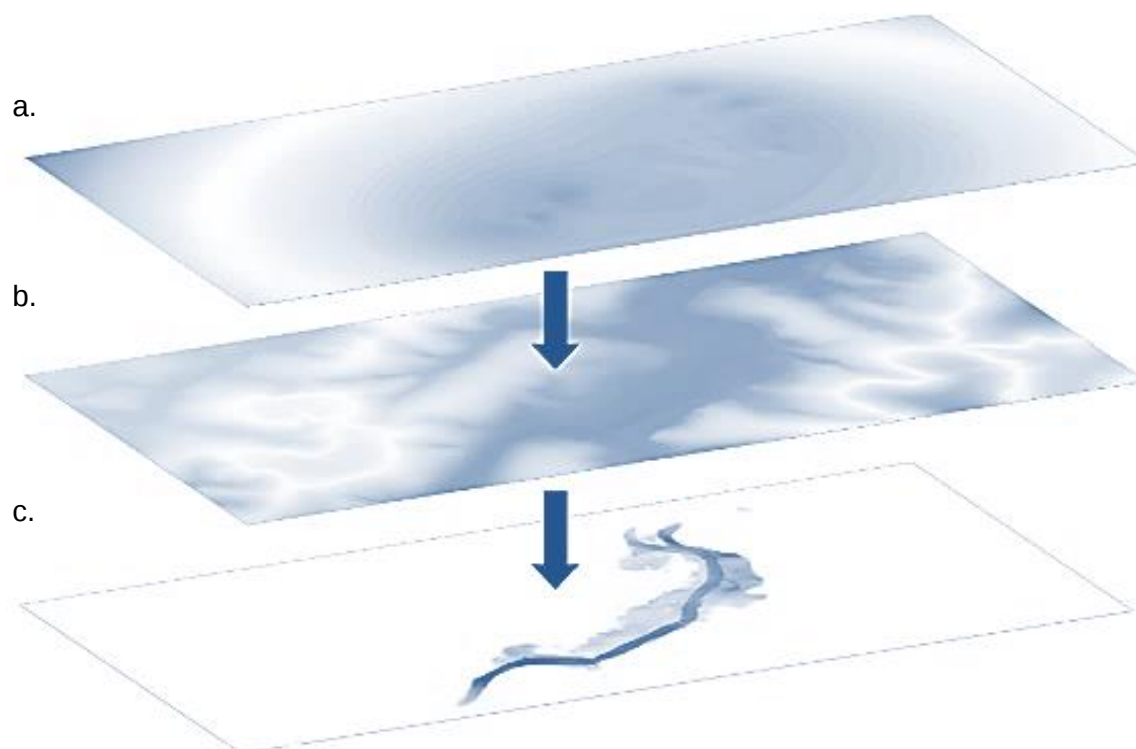
Todos os processos foram realizados no *software* QGIS 3.10.12, gratuito, com código fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados, de modo que a replicação desta metodologia possa ser realizada em outros estudos, sem custos para a aquisição de equipamentos para a coleta de dados em campo, e de *softwares* para o processamento das informações.

Inicialmente, para realização dos processos e aplicação das técnicas de geoprocessamento, dividiu-se a base de dados levantada em campo em dois subconjuntos representativos, um reservado aos procedimentos de calibração e o outro à validação da acurácia dos modelos, quantificando, desse modo, a significância da metodologia.

À vista disso, de modo análogo ao apresentado por Apel *et al.* (2009), Poser e Dransch (2010) e Ribeiro Neto *et al.* (2015), as alturas de lâmina d'água, obtidas em campo, foram convertidas em cota de inundação, considerando o incremento das cotas do terreno. Para esse processo, como base altimétrica de suporte, foi utilizado o MDT de alta resolução obtido por perfilamento a laser através da tecnologia LiDAR, decorrente do sensoriamento remoto, referente aos produtos do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D). A base altimétrica PE3D apresenta densidade de pontos cotados de aproximadamente 1 a cada 2m², com uma resolução espacial de 1m e erro altimétrico associado de até 25cm (CIRILO *et al.*, 2015).

Obtidas então as cotas de inundação (altura da lâmina d'água + cotas do terreno), utilizaram-se os interpoladores espaciais de dados, visando estimar os valores em toda a área de estudo, de forma distribuída (*pixels*) (Figura 4a.). Em seguida, a reconstituição do evento, isto é, a delimitação da área inundada, foi obtida por meio de álgebra de mapas, baseando-se na diferença entre as cotas de inundação interpoladas e o MDT (Figura 4). Logo, os valores resultantes nulos, representativos de locais não inundados, foram excluídos, restando apenas a mancha de inundação estimada por interpolação (Figura 4c.).

Figura 4 - Processo cartográfico aplicado à delimitação da mancha de inundação.



- a. Cota de inundação (altura de lâmina d'água + cota do terreno) interpolada;
- b. MDT – Lidar;

- c. Diferença entre o MDT interpolado e o MDT LiDAR ($a - b$).

Fonte: A Autora (2023).

3.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO

Para mensurar o desempenho dos métodos propostos, a base de dados foi dividida em dois subconjuntos, como supracitado. Esse método, isto é, a validação cruzada, é utilizada para avaliar a capacidade de generalização de determinada técnica, modelo ou algoritmo (REFAEILZADEH; TANG; HUAN, 2009). De fato, a divisão dos dados pode ser feita de diversas formas, originando metodologias distintas de validação cruzada na literatura.

A técnica de validação *holdout*, utilizada nesse estudo, divide a base de dados em duas partes não sobrepostas, uma para treinamento e outra para testes, que não necessariamente possuem o mesmo tamanho (DEVROYE; WAGNER, 1979). Os dados de teste, isto é, de validação, são mantidos fora de todas as rodadas de calibração efetuadas, evitando, desse modo, a sobreposição entre dados. Posto isto, para esse estudo, utilizou-se 70% do total de dados coletados para a fase de calibração e 30% para validação, ambos com representatividade ao longo de toda a extensão da mancha reconstituída.

Com efeito, métricas estatísticas foram aplicadas aos dados para avaliar o desempenho dos modelos propostos, dentre as quais citam-se, *Mean Absolute Error* (MAE), *Percent Bias* (Pbias) e o *Root Mean Square Error* (RMSE).

A média dos erros absolutos é uma forma de contornar o problema do erro médio simples, de modo que, esse parâmetro é menos afetado por pontos com valores extremos (HALLAK; PEREIRA FILHO, 2011). Logo, quanto mais próximo de zero, menor é o erro dos valores obtidos pelas interpolações. Em suma, o MAE indica a magnitude média dos erros absolutos, pois atribui a mesma ponderação a todos os erros. É dado pela seguinte expressão:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |H_{obs} - H_{sim}|}{n} \quad (3)$$

Onde H_{obs} e H_{sim} referem-se às profundidades de inundação recuperadas em campo e obtidas por interpolações, respectivamente.

O indicador Pbias, por sua vez, avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal para o parâmetro é zero,

valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação, de acordo com a expressão pela qual é representado:

$$P_{bias} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{obs} - H_{sim})}{\sum_{i=1}^n (H_{obs})} * 100 \quad (4)$$

Em que H_{obs} representa os valores recuperados em campo e H_{sim} indica as estimativas interpoladas. Desse modo, Moriasi *et al.* (2007) justificam o uso do coeficiente para avaliação de erros no balanço hídrico, com capacidade de identificar o baixo desempenho do modelo.

Por fim, o indicador RMSE é a medida que calcula a raiz quadrática dos erros entre os valores reais, conjunto de validação, e os obtidos pelas interpolações. Esse parâmetro estatístico varia de 0 a ∞ , de forma que, quanto menor o valor do RMSE, mais próxima as estimativas estão dos dados observados. Logo, o RMSE indica a magnitude do erro médio e atribui maior ponderação aos erros maiores. É dado pela seguinte expressão:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs} - H_{sim})^2} \quad (5)$$

Em que, H_{obs} é a altura relativa à profundidade observada em campo e H_{sim} aos produtos interpolados.

Assim, com base nas métricas empregadas, buscou-se avaliar o desempenho dos métodos apresentados (interpoladores) quando comparados ao conjunto de validação, considerando estes últimos permitam a representação acurada acerca do desastre de inundação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DISPONIBILIDADE DE DADOS EM CAMPO

Foi observado através do levantamento de campo que as informações relatadas pelos moradores das áreas afetadas pela inundação ocorrida em maio de 2017, apresentaram boa consistência lógica. Por se tratar de um acontecimento recente, notou-se um índice de detalhamento satisfatório acerca da precisão dos dados fornecidos e à quantidade de marcas presentes nos imóveis, fato que não poderia ser evidenciado em eventos ocorridos há mais tempo, como a inundação de junho de 2010.

Em sucessivas situações, os moradores das áreas de risco relataram que fatos como esses são impossíveis de serem totalmente esquecidos, tanto pelas marcas deixadas pela água, quanto pelo rastro de destruição causado. Ao mesmo tempo, o fato de muitas residências ainda possuírem as marcas deixadas pela inundação ocorrida, contribuiu para a consistência dos dados, minimizando a chance de sub ou superestimação na observação dos moradores.

Em contrapartida, houve dificuldade na obtenção de informações em áreas inabitadas ou de difícil acesso, dada a impossibilidade de coleta de dados, seja por entrevistas ou identificação de marcas de cheia nos imóveis. Com esta observação percebe-se a importância de manter de forma contínua o registro de marcas de cheia sempre que ocorridas, evitando que as informações sejam dissipadas ao longo do tempo.

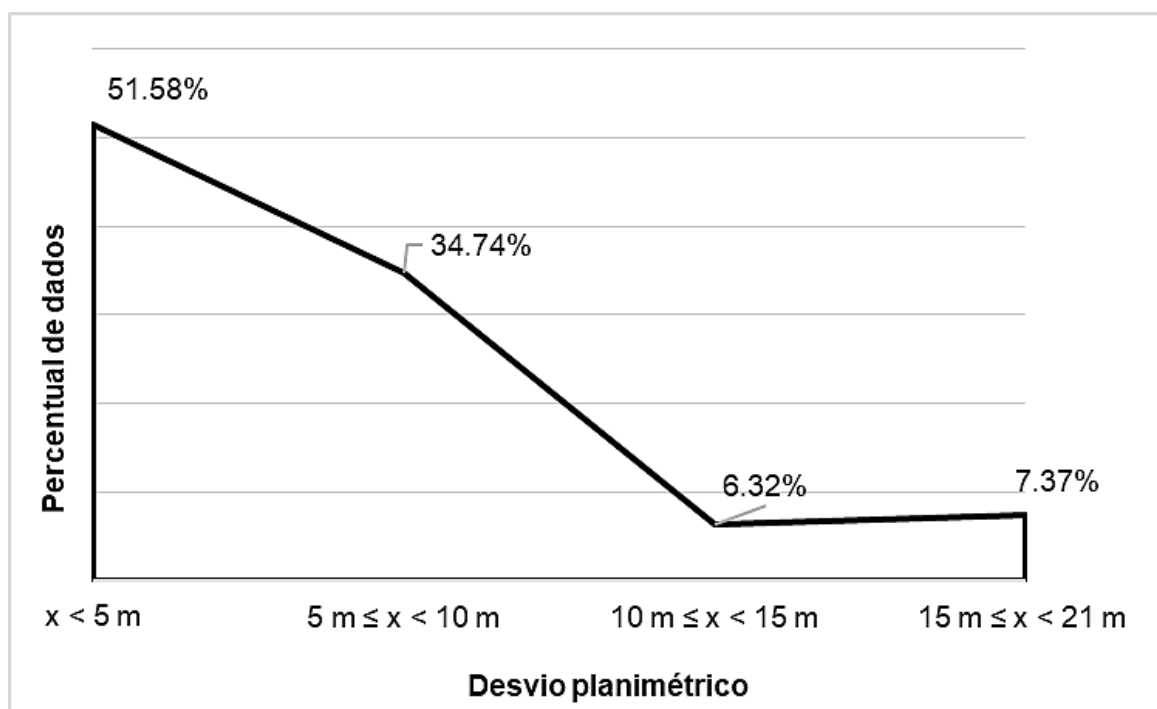
4.2 DESEMPENHO DO APLICATIVO HIDROMAPP

O Hidromapp possui uma interface interativa, didática e de fácil entendimento. Os dados puderam ser coletados a partir do posicionamento do usuário, através do GPS integrado no *smartphone*, ou pela função “apontar no mapa”, a qual possibilita que o colaborador contribua mesmo estando afastado do local atingido. Neste estudo, a função “apontar no mapa” foi essencial para a alocação dos pontos situados em áreas inacessíveis.

No tocante à precisão no posicionamento dos pontos coletados via GPS, observou-se um deslocamento planimétrico médio de 5,46 m entre a posição real dos pontos levantados e a estimativa realizada no aplicativo, sendo esse resultado

avaliado como um bom desempenho (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Entre os 95 pontos coletados através do sistema GPS do *smartphone*, 51,6% destes apresentaram erro planimétrico abaixo de 5 m, e cerca de 7,4 % dos pontos com erro acima de 15 m, sendo o erro máximo identificado de 21 m (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Desvio planimétrico dos pontos coletados via GPS no Hidromapp.



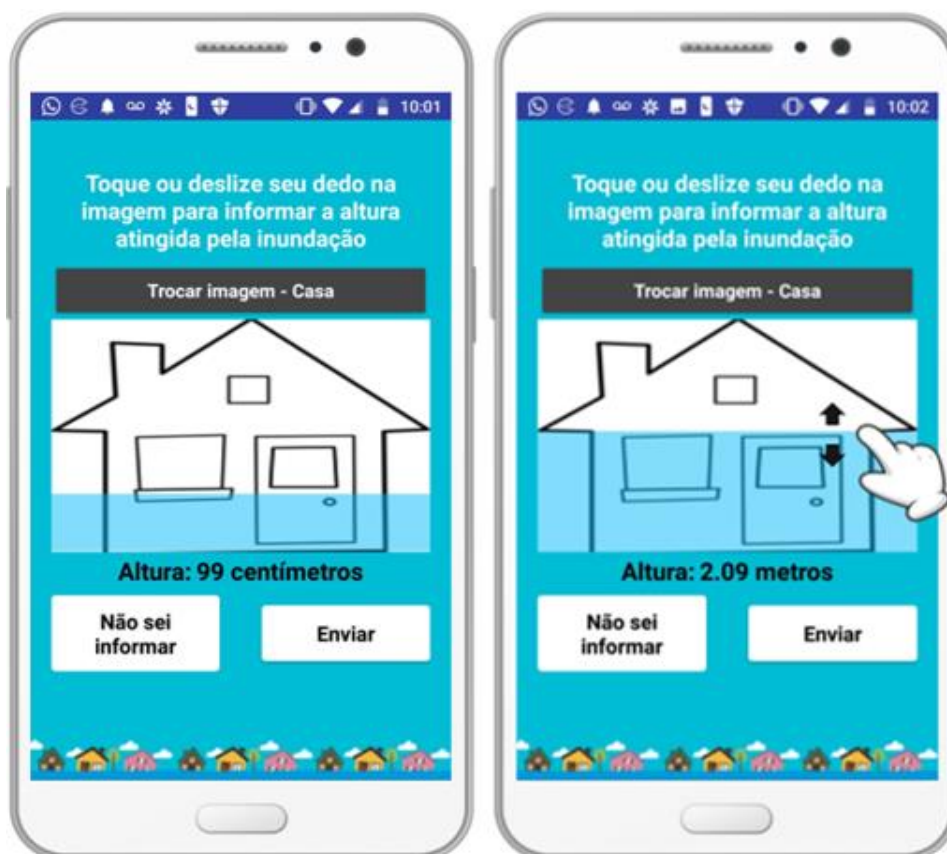
Fonte: A Autora (2023).

Dadas as correções dos pontos após a coleta, destaca-se a necessidade da etapa de verificação e ajuste dos dados quando se trata de levantamentos realizados por receptores GNSS em *smartphones*. Nesse quesito, o método proposto se mostrou eficiente, posto que as fotos registradas em cada ponto permitiram que a posição das informações fosse verificada e ajustada com o auxílio da plataforma *Google Street View*.

Por sua vez, para o registro da altura de inundação, o aplicativo apresenta dimensões normativas que auxiliam o usuário na estimativa das elevações, a exemplo do peitoril da janela, distando aproximadamente 1,00 m do piso, ou ainda a referência de altura das portas, em média 2,10 m (Figura 15). Assim, torna-se viável estimar o alcance da inundação mesmo que o usuário esteja desprovido de instrumentos de medição.

Em contrapartida, o método de registro da altura da lâmina d'água através da opção de deslizar sobre a tela, se mostrou menos eficaz no levantamento realizado, posto que dificultou a inscrição de medidas exatas em campo, aferidas com fita métrica. Dada a sensibilidade do *touch screen* do *smartphone*, foram encontradas dificuldades para informar valores decimais dos dados (Figura 5).

Figura 5 - Interface do aplicativo para registro de dados coletados em campo.



Fonte: A Autora (2023).

Assim, como proposta, sugere-se que o aplicativo disponha de uma função em que o usuário possa informar o valor por meio de digitação, além da função já existente, a qual se faz necessária nos casos em que o usuário não dispõe de aparatos de medição.

A respeito da altura da lâmina d'água, também é importante que o usuário esteja atento quanto ao referencial tomado, pois, como observado em campo, algumas casas são construídas em nível superior ou inferior ao da rua. Nestas situações, foi necessário que as medições fossem compatibilizadas em relação ao nível da rua, que em geral apresenta mais conformidade com o MDT.

Em alguns casos, como os mencionados acima, a função “inserir informações adicionais” permitiu que tais especificidades fossem registradas em cada um dos pontos coletados, na forma de texto, de modo que o aplicativo serviu também como caderneta de campo. O mesmo foi identificado para o registro fotográfico, realizado também com o aplicativo, servindo não só para ilustrar a altura da lâmina d’água, mas como também para averiguar as informações após a coleta e no processamento.

De modo geral, o aplicativo possibilitou que fossem registradas o máximo de informações observadas em campo, sem a necessidade de equipamentos auxiliares para o georreferenciamento dos dados, registro fotográfico, ou para a realização de anotações. Embora o aplicativo tenha sido desenvolvido, a priori, para uso cotidiano pela população, a sua interface e funcionamento se mostraram adequados para aplicações técnicas, como explorado nesse trabalho.

Durante a coleta não foram identificadas dificuldades para a utilização do aplicativo, podendo assim ser adotado por equipes técnicas que atuam na gestão de riscos hidrológicos, independente da sua formação ou grau de instrução. Dada a importância de serem mantidos os registros de marcas de inundação, conforme mencionado anteriormente, o aplicativo Hidromapp se coloca como uma opção para a realização destes levantamentos em campo.

4.3 MANCHA DE INUNDAÇÃO RECONSTITUÍDA E DESEMPENHO DOS MODELOS PROPOSTOS

Após o processamento dos dados levantados em campo, com o uso do aplicativo Hidromapp, e das técnicas de interpolação adotadas em ambiente SIG, descrevem-se as manchas reconstituídas referente à inundação do evento de maio de 2017 em Jaqueira-PE.

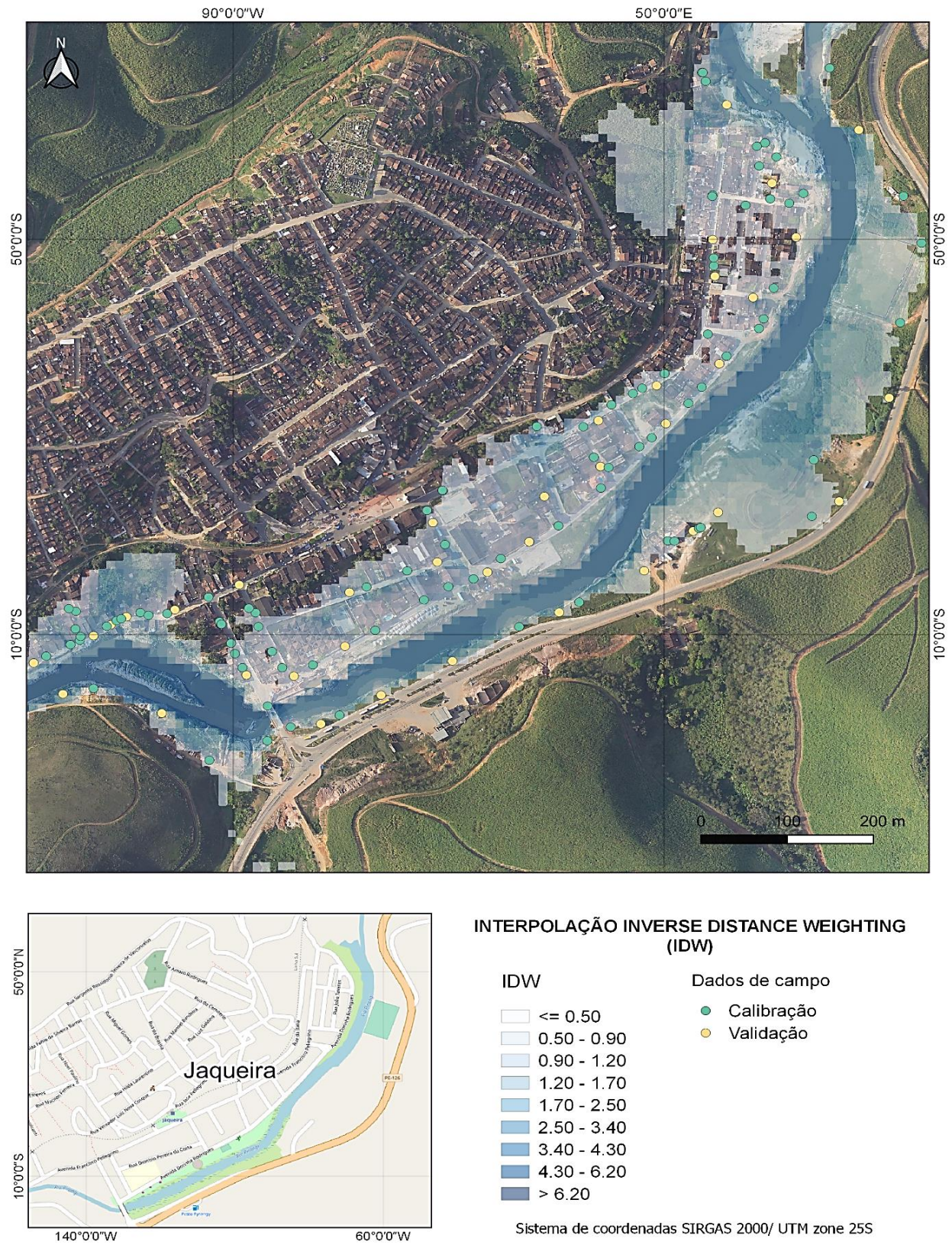
4.3.1 Mancha reconstituída pelo interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW)

O IDW foi escolhido por ser um interpolador exato, isto é, os pontos levantados e as cotas calculadas são iguais aos registros em campo. O processamento computacional é rápido e gera bons resultados quando os pontos são levantados segundo uma malha igualmente distribuída na área do levantamento (DANTAS *et al.*, 2014).

Isto posto, compreendido o efeito do parâmetro que pondera a influência da distância entre os pontos, foi adotado $p = 2$, de modo que os mais próximos exercem maiores intervenções. Para elevação da superfície da água, o RMSE calculado registrou 0,62 m, indicando diferenças significativas ao conjunto de validação. Entretanto, ante os resultados obtidos, apenas 33,33% dos dados apresentaram discrepâncias maiores que 0,5 m. Em relação ao MAE calculado, parâmetro menos afetado por pontos com valores extremos, a interpolação registrou 0,43 m, traduzindo menor erro aos valores obtidos. Com relação a tendência da média dos valores apresentada ante aos dados observados, o parâmetro P_{bias} equivalente a -26,26 traduz a superestimação da lâmina de profundidade gerada, de acordo com a expressão pela qual foi apresentado. Desse modo, o Mapa 3 ilustra o cenário gerado pelo interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW), nativo do *software* QGIS.

À vista disso, para região onde está localizada a PE-126, o modelo respondeu satisfatoriamente, de modo que não extrapolou a inundação para esta área, de acordo com o evento real. Similarmente, a área comercial não foi incluída à mancha reconstituída, conforme verificado pelo evento. Logo, observou-se que o modelo aplicado conseguiu identificar bem a extensão de alcance da mancha de inundação.

Mapa 3 - Mancha reconstituída com o interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW) para o município de Jaqueira-PE.



Fonte: A Autora (2023).

4.3.2 Mancha reconstituída pelo interpolador *Multilevel B-Spline*

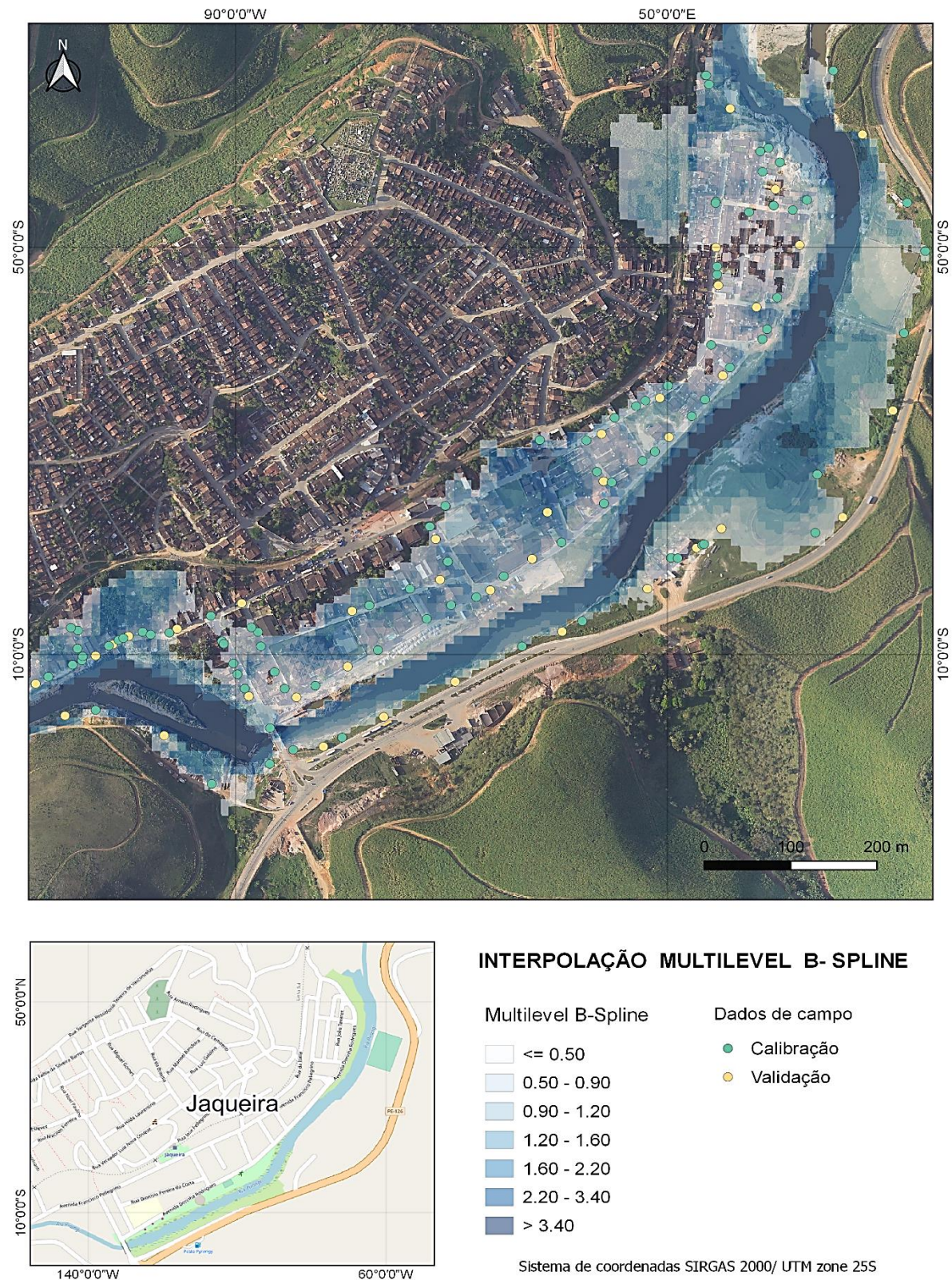
O interpolador *Spline* foi escolhido por se tratar de estimador espacial determinístico adequado para amostras irregulares (Lee *et al.*, 1997). Desse modo, as interpolações são realizadas a partir de uma sequência de funções B-Spline bicúbicas, geradas de forma iterativa e baseadas na otimização de função objetivo.

Ante aos resultados, apenas 25,60% dos dados apresentaram discrepâncias superiores a 0,5 m quando comparado ao conjunto reservado à validação. Para o RMSE calculado, referente a elevação da superfície da água, foi registrado o equivalente a 0,64 m, entretanto, a média dos erros absolutos, parâmetro menos afetado por valores extremos, apresentou valor bastante inferior, 0,38 m. Para tanto, o cenário interpolado traduz um panorama superestimado, uma vez que o Pbias registrou um valor equivalente a -25,59.

Dessa forma, o Mapa 4 ilustra a conjuntura gerada de acordo com o interpolador *Multilevel B-Spline*, disponível no módulo SAGA GIS, *software* QGIS. Isto posto, para a região onde está localizada a PE-126, margem direta do leito do rio, o modelo respondeu satisfatoriamente, pois não extrapolou a mancha para esta área, similarmente aos dados recuperados em campo.

Os dados com discrepâncias maiores que 1,00 m, equivalente a 10% dos pontos recuperados estão localizados em regiões com declividade acentuada. Evidenciando a necessidade de maior precisão de posicionamento, visto que pequenos deslocamentos podem comprometer a profundidade de inundação estimada.

Mapa 4 - Mancha reconstituída com o interpolador *Multilevel B-Spline* para o município de Jaqueira-PE.



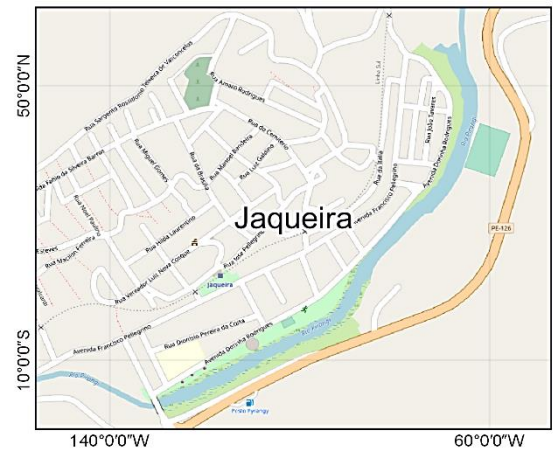
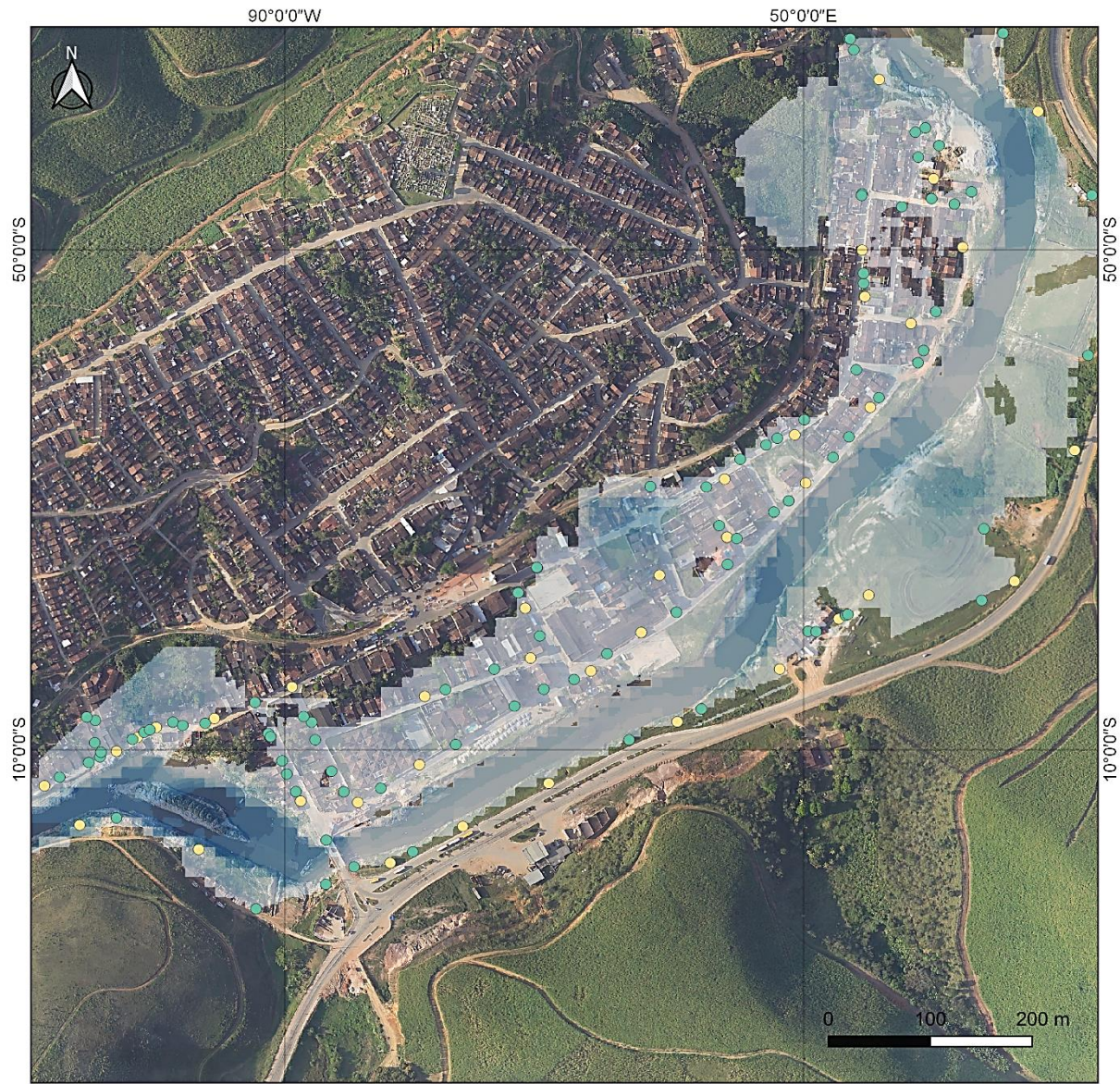
Fonte: A Autora (2023).

4.3.3 Mancha reconstituída pelo interpolador *Triangulated Irregular Network* (TIN)

Devido à sua natureza local e exata, os métodos costumam ser rápidos, de fácil incorporação de descontinuidades e feições estruturais. Em regiões onde há pouca variação de declividade da superfície, os pontos podem ser mais espaçados, enquanto que em áreas de variação mais intensa na declividade o número de pontos amostrados deve ser maior, de forma que a superfície seja representada com fidelidade. Desse modo, os pontos devem ser escolhidos de modo a captar as mudanças significativas nas formas da superfície.

Compreendidas as atribuições, para a elevação da superfície da água, o RMSE calculado registrou 0,64 m, com diferenças significativas ao conjunto de validação, não obstante, 28,20% dos dados apresentaram discrepâncias maiores que 0,5 m. Logo, a média dos erros absolutos, MAE, apresentou valor equivalente a 0,40 m quando comparado ao conjunto de validação de dados. De modo similar, o cenário gerado pelo interpolador traduz uma conjuntura superestimada, posto que o parâmetro Pbias registrou valor equivalente a -31,47. Assim, o Mapa 5 ilustra o cenário gerado pelo interpolador *Triangulated Irregular Network* (TIN), nativo do software QGIS.

Mapa 5 - Mancha reconstituída com o interpolador *Triangulated Irregular Network* (TIN) para o município de Jaqueira-PE.



INTERPOLAÇÃO TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK (TIN)

TIN	Dados de campo
<= 0.70	Calibração
0.70 - 1.60	Validação
1.60 - 2.40	
2.40 - 3.20	
3.20 - 4.00	
4.00 - 4.80	
4.80 - 5.60	
5.60 - 6.40	
> 6.40	

Sistema de coordenadas SIRGAS 2000/ UTM zone 25S

Fonte: A Autora (2023).

Em suma, a Tabela 3 sintetiza as métricas usadas para avaliar os produtos gerados pelos interpoladores supracitados.

Tabela 3 - Métricas calculadas acerca dos interpoladores investigados.

	<i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	<i>Multilevel B-Spline</i>	<i>Triangulated Irregular Network (TIN)</i>
RMSE	0.62 m	0.64 m	0.64 m
MAE	0.43 m	0.38 m	0.40 m
Pbias	-26.26	-25.59	-31.47

Fonte: A Autora (2023).

Posto isto, estudos correlatos apontam diferenças significativas quanto ao RMSE para a elevação da superfície da água. De modo que os valores calculados são compatíveis aos apresentados por Apel *et al.* (2009), Poser e Dransch (2010) e Scorzini *et al.* (2018), com RMSE obtido de 0,87 m, 0,76 m e 0,5 m, respectivamente.

Para os dados com as maiores discrepâncias relatadas, nota-se pontos situados em áreas com declive acentuado, onde pequenos deslocamentos planimétricos podem comprometer a profundidade da lâmina estimada. Nesse sentido, uma alternativa é o ajuste de posição dos pontos para que a profundidade de inundação seja equivalente aos valores situados em margens opostas. Além disso, mecanismos para o refinamento da planície de inundação também podem ser aplicados, conforme apresentado em Samela *et al.* (2018) e Nardi *et al.* (2006), onde foram usadas técnicas de geoprocessamento e dados geomorfológicos para remover distorções na estimativa da área inundada.

Os métodos aplicados permitiram a identificação dos mesmos locais de maior dano específico agregado reconhecido pelos moradores, como a Rua Francisco Pellegrino, Rua José Pellegrino e Avenida Dorinha Rodrigues, dentre as quais abrigam creches municipais, escolas, quadras esportivas e o pátio de eventos.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo buscou mapear as áreas sujeitas a inundações no município de Jaqueira por meio de levantamento de dados de campo, realizado com o aplicativo Hidromapp, para avaliar sua aplicabilidade para fins técnicos. Além disso, o uso de algoritmos baseados em sobre interpolações para a reconstituição de manchas de inundação marcas foi investigado.

Em comparação com os dados recuperados em campo, os resultados da metodologia aplicada foram parcialmente satisfatórios, apresentando um bom desempenho na estimativa de áreas alagadas (extensão), mas em alguns pontos com discrepâncias consideráveis para a cota estimada de elevação da superfície. Nesse sentido, os indicadores usados para avaliar resultados foram adequados e permitiram análises quantitativas e sistemáticas dos modelos propostos.

Observou-se que a principal fonte de erro foi concentrada em pontos coletados em locais inacessíveis e/ou não amostrados, especialmente em áreas inabitadas, o que resultou em distorção dos modelos interpolados. Quanto a isto, há possibilidade de ajuste dos valores de profundidade, ainda em pré-processamento, além de outros mecanismos de refinamento que podem ser explorados.

Além disso, a importância da coleta de dados no imediatamente após o evento de inundação foi evidenciado. Isto possibilitou o registro de marcas de inundação em toda a área alagada, contribuindo para melhores resultados na interpolação. Sobre a abordagem explorada, espera-se que os procedimentos metodológicos apresentados possam contribuir para os profissionais da Defesa Civil e Sistema de Proteção para atuar no registro de marcas de inundação, pois a confiabilidade das informações é fundamental para bons resultados.

Os interpoladores de dados selecionados (*Inverse Distance Weighting*, *Multilevel B-Spline* e *Triangulated Irregular Network*) apresentaram bom desempenho, dentre suas particularidades. De modo que os principais erros se concentraram em locais onde as informações coletadas indicavam inconsistências. Compreendidas as potencialidades e limitações, foi observado que o *Multilevel B-Spline* obteve melhor ajuste aos dados, tanto pelas métricas calculadas quanto pelo custo computacional associado.

O Hidromapp, aplicativo utilizado para coleta de dados em campo, é leve, fácil de usar, com baixo consumo de energia e demanda de dados móveis. Assim, seu uso

é recomendado para coleta de campo de inundações marcas, mesmo em aplicações técnicas. No entanto, como a plataforma não possui ferramentas para os usuários baixarem os dados, é necessário estabelecer comunicação direta com os idealizadores do projeto para solicitar e obter acesso aos dados coletados neste experimento. Logo, este estudo pretende permitir novas possibilidades no campo de engenharia para este aplicativo, tanto por seu baixo custo quanto pela facilidade de manuseio. Assim, incentivando sua inserção como suporte técnico ferramenta para coleta de marcas de inundação, bem como o uso de dados coletados informações para mapeamento de enchentes.

Em suma, a abordagem metodológica apresentada visa principalmente apoiar pequenos municípios com recursos econômicos limitados disponível para o mapeamento de inundações, que é considerado uma das principais ferramentas na gestão do risco hidrológico.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para novos trabalhos a serem desenvolvidos acerca de viés semelhante, recomenda-se:

- Explorar o desempenho da metodologia proposta usando MDE de mais baixa resolução, como SRTM, MERIT, FABDEM e NASADEM, contribuindo para a candidatura da metodologia apresentada em larga escala ou em municípios que não possuem MDE de alta resolução espacial.
- Explorar o desempenho da metodologia com interpoladores probabilísticos e anisotrópicos, como krigagem anisotrópica, com o intuito de investigar o comportamento de pontos que provocam grande distorção ao produto gerado.

REFERÊNCIAS

- AFZAL, M. A.; ALI, S.; NAZEER, A.; KHAN, M. I.; WAQAS, M. M.; ASLAM, R. A.; CHEEMA, M. J. M.; NADEEM, M.; SADDIQUE, N.; MUZAMMIL, M.; SHAH, A. N. Flood Inundation Modeling by Integrating HEC–RAS and Satellite Imagery: A Case Study of the Indus River Basin. **Water**, v.14, n.19, 2984, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14192984>
- ALVES, K. M. A. S.; CAVALCANTI, L.; NÓBREGA, R. S. Eventos extremos e risco de inundação: uma análise do comportamento evolutivo dos distúrbios ondulatórios de leste em junho de 2010 sobre a bacia do Rio Una Pernambuco. **Geotextos**, v. 9, n. 2, p. 173-189, 2013.
- AMORIM, G.; SILVA, S. Gerenciamento de risco de enchente: o caso Palmares. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, p. 268-277, 2016.
- ANDJELKOVIC, I. **Guidelines on non-structural measures in urban flood management**. IHP, Technical Documents in Hydrology, n. 50, UNESCO, Paris, 2001. 87 p.
- ANDRIOTTI, J. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo - RS: Editora UNISINOS, 2003. 168 p.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Climas. **Monitoramento Pluviométrico**, 2020. Disponível em: < <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php#>>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- APEL, H.; ARONICA, G.; KREIBICH, H.; THIEKEN, A. Flood risk analyses – how detailed do we need to be? **Natural Hazards**, v. 49, n. 1, p. 79-98, set. 2009.
- ARRIGHI, C.; BRUGIONI, M.; CASTELLI, F.; FRANCESCHINI, S.; MAZZANTI, B., Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modeling and census data. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, p. 1375-1391, 2013. DOI:10.5194/nhess-13-1375-2013.
- BANCO MUNDIAL. **Avaliação de Perdas e Danos: Inundações Bruscas em Pernambuco – Junho 2010**. Banco Mundial. Brasília, p. 75. 2012. Disponível em:< <https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/Inundaes-Bruscas-em-Pernambuco.pdf>>. Acesso em: 19 fev. 2021.
- BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B.; CANALI, G. V.; CABRAL, J. J. S. P.; AZEVEDO, J. R. G.; MONTENEGRO, S. M. G. L. **Hidráulica Aplicada**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2003. 621 p. ISBN 85-88686-02-3
- BARTH, R. T. **Planos Diretores em Drenagem Urbana: Proposição de Medidas para a sua implementação**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

BARTLETT, A. C.; ANDALES, A. A.; ARABI, M.; BAUDER, T. A. A smartphone app to extend use of a cloud-based irrigation scheduling. **Tool Computers and Electronics in Agriculture**, v. 111, p. 127-130, 2015.

BECCHI, I. Essere informati: La migliori arma contro le alluvioni. **Interviste RAI-Cittadino**, Teche RAI, Roma, Itália, 2001.

BÍBLIA, A. T. Isaías. *In*: BÍBLIA. Português. Sagrada Bíblia Católica: Antigo e Novo Testamentos. Tradução de José Simão. São Paulo: Sociedade Bíblica de Aparecida, 2008.

BINNS, A. D. Flood mitigation measures in an era of evolving flood risk. **Journal of Flood Risk Management**, v. 13, n. 3, p. 13–15, 2020.

BLÖSCHL, G.; GAÁL, L.; HALL, J.; KISS, A.; KOMMA, J.; NESTER, T.; PARAJKA, J.; PERDIGÃO, R. A. P.; PLAVCOVÁ, L.; ROGGER, M.; SALINAS, J. L.; VIGLIONE, A. Increasing River floods: Fiction or reality? **WIREs Water**, v. 2, p. 329-344, 2015.

BORGA, M.; ANAGNOSTOU, E.N.; G. BLOSCHL, G.; CREUTIN, J.D. Flash flood forecasting, warning and risk management: the HYDRATE project. **Environmental Science & Policy**, v. 14, p. 834- 844, 2011.

BRASIL. **Lei 12.608, de 12 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12608.htm#art31 > Acesso em: 31 jan. 2021.

BROUWER, T.; EILANDER, D.; van LOENEN, A.; BOOIJ, M. J.; WIJNBERG, K. M.; VERKADE, J. S.; WAGEMAKER, J. Probabilistic flood extent estimates from social media flood observations. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.17, n. 5, p. 735–747, 2017. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-735-2017>

BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 1, n. 2, p. 189-190,1987. <https://doi.org/10.1080/02693798708927804>

CARMO, E. J.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, G. R. Avaliação dos interpoladores krigagem e topo to raster para geração de modelos digitais de elevação a partir de um “as built”. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 4, p. 674-690, 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198221702015000400674&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 21 fev. 2021. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702015000400039>.

CAVALCANTI, R. C.; TAVARES JUNIOR, J. R.; CANDEIAS, A. L. B. Simulação de mapeamento de riscos de inundações usando dados LiDAR: estudo de caso da bacia do Rio Una - PE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 65, n. 4, p. 703-716, 2013.

CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 501–504, 2003.

CEPED - CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES, UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: volume Brasil**. Florianópolis, 2012.

CEXCHUV. Comissão Externa das Chuvas em Alagoas e Pernambuco. **Relatório final da Comissão Externa das Chuvas em Alagoas e Pernambuco**. Recife: PE, Comissão Externa das Chuvas em Alagoas e Pernambuco, 2017.

CHAVES, M. A. **Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônia**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2002.

CHEN, B.; KRAJEWSKI, W. F.; GOSKA, R.; YOUNG, N. Using LiDAR surveys to document floods: A case study of the 2008 Iowa flood. **Journal of Hydrology**, 553, 338-349, 2017.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, B. M. S.; CAMPOS, P. H. A. L. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 12., 2015, Brasília. **Anais...** Brasília, 2015.

COBRADE. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres**. Disponível em: <<https://defesacivil.es.gov.br/Media/defesacivil/Publicacoes/Simbologia%20dos%20Desastres.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2021.

CREA-PE. Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco. **Projeto de Apoio Técnico do CREA-PE aos Municípios em estado de emergência da Mata Sul**. Recife, PE, p. 142. 2017. Disponível em: <<https://www.creape.org.br/relatorios-do-projeto-de-apoio-aos-municipios-da-mata-sul/ATÓRIOS DO PROJETO DE APOIO AOS MUNICÍPIOS DA MATA SUL – Crea-PE>>. Acesso em: 19 fev. 2021.

CRED. Center for Research on the Epidemiology of Disasters. **Disaster Year in Review 2022**, 2023. Disponível em: <https://cred.be/sites/default/files/2022_EMDAT_report.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2023.

CRED. Center for Research on the Epidemiology of Disasters. **Human cost of disasters (2000-2019)**, 2020. Disponível em: <<https://cred.be/sites/default/files/CredCrunch61-Humancost.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2021.

DANTAS, C. E. O.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Análise Estatística Regional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 4, p. 239-248, 2014.

DATAR, A.; LIU, J.; LINNEMAYR, A.; STECHER, C. The impact of natural disasters on child health and investments in rural India. **Social Science & Medicine**, v. 76, p. 83-91, 2013.

DEGIORGIS, M.; GNECCO, G.; GORNI, S.; ROTH, G.; SANGUINETI, M.; TARAMASSO, A. C. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, v. 12, p. 302-315, 2012.

DEL ROSARIO, M. B.; REDMOND, S. J.; LOVELL, N. H. Tracking the Evolution of Smartphone Sensing for Monitoring Human Movement. **Sensors**, vol. 15, n.9, pp. 18901-18933, 2015. DOI: 10.3390/s150818901

DEVROYE, L.; WAGNER, T. J. Distribution-free performance bounds for potential function rules. **IEEE Transactions on Information Theory**, v.25, n. 5, p. 601-604, 1979. DOI:10.1109/TIT.1979.1056087.

ECKHARDT, R. R. **Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado / RS**. Mestrado em Sensoriamento Remoto da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul – UFRGS, Porto Alegre (RS), 2008.

EL-HATTAB, A. I. Single beam bathymetric data modelling techniques for accurate maintenance dredging. **Egyptian J Remote Sens Space Sci**, v.17, n.2, p. 189–195, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2014.05.003>

EMERY, W.; THOMSON, R. **Data Analysis in Physical Oceanography**. Pergamon Press, New York, 1997, 634p.

ESCOBAR-SILVA, E. V.; ALMEIDA, C. M.; SILVA, G. B. L.; BURSTEINAS, I.; ROCHA FILHO, K. L.; OLIVEIRA, C. G.; FAGUNDES, M. R.; PAIVA, R. C. D. Assessing the Extent of Flood-Prone Areas in a South-American Megacity Using Different High Resolution DTMs. **Water**, v. 15, n. 1127, 2023. <https://doi.org/10.3390/w15061127>.

FABRE, V. V.; SCHEEFFER, F.; DALLABONA, L.F.; KROETZ, M. Analysis of expenditures with environmental management on the political-ideological behavior of managers, from the point of view of the theory of political choices. **Brazilian Journal of Development**, v. 4, n. 2, p. 514-531, 2018.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. Mapping the Zone: **Improving Flood Map Accuracy**. Washington, DC: National Academies Press, 2009. 122 p.

FEW R.; AHERN M.; MATTHIES, F.; KOVATS, S. **Floods, health and climate change: a strategic review**. Working Paper 63. Tyndall Centre for Climate Change Research, 138 p. 2004.

FITZ, P. R. **Cartografia Básica**. Canoas: La Salle, 2000. 171 p.

FLORIANI, L. D.; MAGILLO, P. Triangulated irregular network. In: L.I.U. L., ÖZSU M.T. (eds) Encyclopedia of database systems. **Springer**, Boston, MA, 2009. https://doi.org/10.1007/978-0-387-39940-9_4378

FRANK, B.; PINHEIRO, A. (Org.). **Enchentes na bacia do Itajaí: 20 anos de experiências**. 1. ed. Blumenau: Editora da FURB, 2003. 237 p.

GALI, M.; BORUFF, B.J.; CUTTER, S.L. Assessing flood hazard zones in the absence of digital floodplain maps: comparison of alternative approaches. **Natural Hazards Review**, v. 8, p. 1-12, 2007.

GARCIA, F. R.; ALIZANDRINI JÚNIOR, M. J. Comparação de MDTs a partir do acoplamento de modelo hidrológico e hidrodinâmico aplicado à identificação de áreas de inundações urbanas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 02, p.783-803, 2022. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.2.p783-803>.

GILLESPIE, T. W.; CHU, J.; FRANKENBERG, E.; THOMAS, D; Assessment and prediction of natural hazards from satellite imagery. **Progress in Physical Geography**, v. 31, n. 5, p. 459-70, 2007.

GIUTOLI, I. **Sistemas Web-GIS participativo associado a indicadores de gestão descentralizada de risco de inundações**. Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP, São Carlos (SP), 2008.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. M. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco a inundação: estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim de Geografia**, v. 30, n. 1, 2012.

GOERL, R.F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as Inundações no Brasil. **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2005.

GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, P.; BELOW, R. **Annual Disaster Statistical Review 2013: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED, p. 10, 2014.

GUIRRO, M. O.; MICHEL, G. P. Hydrological and hydrodynamic reconstruction of a flood event in a poorly monitored basin: a case study in the Rolante River, Brazil. **Natural Hazards** v. 117, p. 723–743, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05879-1>

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608. 2011.

HO, C.; LAI, C.; ALMONNIEAY, A. Using Geographic Information Systems and Smartphone-Based Vibration Data to Support Decision Making on Pavement Rehabilitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION PROCESSING AND MANAGEMENT OF UNCERTAINTY IN KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS, 16., 2016, Eindhoven. **Anais...** Eindhoven, 2016.

HORA, S. B. **Mapeamento e avaliação do risco a inundação do rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna – BA**. Mestrado em Desenvolvimento Regional e meio Ambiente da Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus (BA), 2009.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Amostra por Domicílio Contínua (PNAD 2021)**: acesso à internet e à televisão e

posse de telefone móvel celular para uso pessoal: 2021. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Cidades e Estados**, 2022. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/jaqueira.html>>. Acesso em: 20 junho 2023.

JALAYER, F.; RISI, R.; PAOLA, F.; GIUGNI, M.; MANFREDI, G.; GASPARINI, P.; TOPA, M. E.; YONAS, N.; YESHITELA, K.; NEBEBE, A.; CAVAN, G.; LINDLEY, S.; PRINTZ, A.; RENNER, F. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. **Natural Hazards**, v. 73, n. 2, p. 975-1001, 2014.

JIMENEZ, K. Q.; DOMEQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.16, 2008.

JOYCE, K. E.; BELLIS, S. E.; V, S.; MCNEILL, S. J.; GLASSEY, P. J. A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping natural hazards and disasters. **Progress in Physical Geography**, v. 33, n. 2, p. 183-207, 2009.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F. Quantitative method to distinguish flood and flash flood as disasters. **SUISUI Hydrological Research Letters**, v. 1, p. 11-14, 2007. DOI:10.3178/suisui.1.11

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba, PR: Organic Trading, 2006.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. **Agronomy Journal**, American Society of Agronomy, v. 91, n. 3, p. 393–400, 1999.

KRÜGER, C. M.; DZIEDZIC, M. **Drenagem Urbana**. Módulo 2. Prefeitura Municipal de Curitiba – Instituto Municipal de Administração Pública/IMAP – Plano de Competências, 2014. Disponível em:< <https://docplayer.com.br/14489863-247-drenagem-urbana-modulo-2.html>>. Acesso em 02 fev. 2021.

KUNDZEWICZ, Z. W. Non –Structural Flood Protection and Sustainability. **Water International**, v. 27, n. 1, p. 3-13, 2002.

KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS N.; PEDUZZI, P.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; ARNELL, N.; MACH, K.; MUIR-WOOD, R.; BRAKENRIDGE, G.R.; KRON, W.; BENITO, G.; HONDA, Y.; TAKAHASHI, K.; SHRESTYUKOV, B. Flood risk and climate change: global and regional perspective. **Hydrological Science Journal**, v. 59, n. 1, p. 1-28, 2014.

LEANING, J.; GUHA-SAPIR, D. Natural Disasters, Armed Conflict, Public Health. **The New England Journal of Medicine**, v. 369, n. 19, p. 1836-1842, 2013. DOI:10.1056/NEJMra1109877

LEE, J. Comparison of existing methods for building triangular irregular network, models of terrain from grid digital elevation models. **International Journal of Geographical Information Systems**, v.5, n.3, p. 267- 285, 1991. <https://doi.org/10.1080/02693799108927855>

LEE, S.; WOLBERG, G.; SHIN, S. Y. Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines. **IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics**, v.3, n.3, p. 228-244. <http://dx.doi.org/10.1109/2945.620490>

LENNON, J. J.; TURNER, J. R. G. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. **Journal of Animal Ecology**, v. 64, n.3, 670-392, 1995.

LONDE, L. R.; MARCHEZINI, V.; CONCEIÇÃO, R. S.; BORTOLETTO, K. C.; SILVA, A. E. P.; SANTOS, E. V.; REANI, R. T. Impactos de desastres socioambientais em saúde pública: estudos dos casos dos Estados de Santa Catarina em 2008 e Pernambuco em 2010. **Revista Brasileira de Estudos da População**, v. 32, n. 3, p. 537-562, 2015.

LONGLEY, P. A.; MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. **Sistemas e Ciência da Informação Geográfica**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 9, p. 1044 – 1055, 2008. ISSN 0098-3004

LÜTHI, B.; PHILIPPE, T.; PEÑA-HARO, S. Mobile device app for small open-channel flow Measurement. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE, 7., 2014, San Diego. **Anais...** San Diego, 2014.

MACHADO, C. C. C.; NÓBREGA, R. S.; OLIVEIRA, T. H.; ALVES, K. M. A. S. Distúrbio Ondulatório de Leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 11, p. 146-188, 2012.

MAEDA, H.; SEKIMOTO, Y.; SETO, T. Lightweight Road Manager: Smartphone-based automatic determination of road damage status by deep neural network. In: ACM SIGSPATIAL INTERNATIONAL WORKSHOP ON MOBILE GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, 5., 2016, Burlingame. **Anais...** Burlingame, 2016.

MAKSIMOVIC, C.; TODOROVIC, Z. **Non-Structural vs. Structural Alternatives in Sustainable Urban Runoff Management**. In: International Workshop on NonStructural Flood Control in Urban Areas, 1998. University of São Paulo, Brazil.

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de risco de desastres naturais do estado de Santa Catarina. **Caminhos da Geografia (UFU)**, Uberlândia, v. 7, n. 17, p. 72-84, 2006.

MARCELINO, E.V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Caderno Didático n.º 1. Santa Maria: INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.

MATA-LIMA, H.; ALVINO-BORBA, A.; PINHEIRO, A.; MATA-LIMA, A.; ALMEIDA, J.A. Impactos dos desastres naturais nos sistemas ambiental e socioeconômico: o que faz a diferença? **Ambiente & Sociedade**, v. 16, n. 3, p. 45-64, 2013.

MATOS, J. L. **Fundamentos de Informação Geográfica**. Ed. Libel, Lisboa. 2008, 424p.

MENDES, C.A.B.; CIRILO, J.A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536 p., 2001.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 152–167, 2016.

MONTEIRO, K. A.; CORREA, A. C. B.; MELO, R. F. T.; MEIRA, D. A.; NÓBREGA, R. S.; GIRAO, O. Parâmetros morfométricos aplicados à bacia do Rio Una (Pernambuco-Brasil) para identificar susceptibilidade a enchentes. **Revista Geográfica de América Central**, v. 1, n. 52, p. 163-177, 2014.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)**, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2013.

MONTEIRO, L. R.; KOBIYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**, v. 10, p. 13-25, 2013.

MOORE, R. J.; BELL, V. A.; JONES, D. A. Forecasting for flood warning. **Comptes Rendus Geosciences**, v. 337, p. 203-217, 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.017>

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. DOI:10.13031/2013.23153.

MOURA, R. B.; CANIL, K. Medidas estruturais adotadas em áreas de risco de movimentos gravitacionais de massa e sua contribuição para construção de cidades resilientes. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 44-49, 2017.

NARDI, F.; VIVONI, E. R.; GRIMALDI, S. Investigating a floodplain scaling relation using a hydrogeomorphic delineation method. **Water Resources Research**, v. 42, n.9, p. 1-15, 2006. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004155>

NASCIMENTO, R. C.; COSTA, R. M. E. M. Não-Alague – Um aplicativo que integra multiagentes e mapeamento colaborativo para indicar pontos de alagamento na cidade do Rio de Janeiro. **Cadernos do IME: Série Informática**, v. 39, 2017.

OCHA. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. **Latin America and the Caribbean: Natural Disasters 2000-2019**. 2020. Disponível em: <<https://www.humanitarianresponse.info/en/operations/latin-america-and-caribbean/document/latin-america-and-caribbean-natural-disasters-2000>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

OCHA. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs. **State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2021**. 2022. Disponível em: <<https://storymaps.arcgis.com/stories/c88d1457a7f945cdae51a47cc1bdbbee2>>. Acesso em 20 jun. 2023.

OLIVEIRA, G. A. **Desastres Hidrológicos e Informações Geográficas Voluntárias: concepção de sistema colaborativo para o mapeamento de áreas de riscos**. Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana da Universidade Federal da Bahia - UFBA. Salvador, 2017.

OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; BRITO, P. L.; ELIAS, E. N. N. Qualidade do posicionamento em aplicativos VGI obtido por sensores de localização em smartphones. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 806-831, 2019.

OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO, A. A. S. Desenvolvimento de plataforma colaborativa para registro de inundações na escala intraurbana. In: ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 12., 2018. Maceió, AL: ABRH, 2018.

OLIVEIRA, G. A.; RIBEIRO, A. A. S.; CIRILO, J. A. Collaborative spatial information as an alternative data source for hydrodynamic model calibration: a Pernambuco State case study, Brazil. **Natural Hazards**, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06073-z>

OLIVEIRA, R. L. M.; SILVA, S. R. Estudos de eventos extremos de chuva na bacia hidrográfica do Rio Una. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 2, n. 1, p. 156-160, 2016.

OPEYEMI, A. Z.; WEI, J.; OLUSOLA, F. Urban Expansion and the Loss of Prairie and Agricultural Lands: A Satellite RemoteSensing-Based Analysis at a Sub-Watershed Scale. **Sustainability**, v.11, n. 4673, 2019.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Gestión Integrada de Crecientes**. Documento Conceptual. Ginebra, Suíça, 2004.

PEREIRA, M. L. T.; SOARES, M. P. A.; SILVA, E. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; SOUZA, W. M. Variabilidade climática no Agreste de Pernambuco e os desastres decorrentes dos extremos climáticos. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 394-402, 2017.

PINTO, S. **Um sistema de representação de relevos**. Dissertação de mestrado. Departamento de Ciência da Computação/Instituto de Ciências Exatas/ Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (MG), 1994.

PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 540 p.

POSER, K.; DRANSCH, D. Volunteered geographic information for disaster management with application to rapid flood damage estimation. **Geomatica**, v. 64, n. 1, p. 89-98, 2010.

POURALI, S. H.; ARROWSMITH, C.; CHRISMAN, N.; MATKAN, A. A.; MITCHELL, D. Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. **Applied Spatial Analysis and Policy**. p. 1-16, 2014.

RAMOS, Y. S.; Rêgo, S. C. A.; RIBEIRO, G. N.; PEDROZA, J. P.; BARROS, D.F. Integração Geoprocessamento SIG na identificação de área susceptíveis à inundação. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 7, n. 5, p. 91-95, 2013.

RANA, I.A.; ROUTRAY, J.K. Integrated methodology for flood risk assessment and application in urban communities of Pakistan. **Natural Hazards** v. 91, p. 239–266, 2018.

REFAEILZADEH, P.; TANG, L.; LIU, H. Cross-Validation. **Encyclopedia of Database Systems**, p.532–538, 2009. Disponível em: <<http://dblp.uni-trier.de/db/reference/db/c.html#RefaeilzadehTL09>>.

RIBEIRO NETO, A.; CIRILO, J. A.; DANTAS, C. E. O.; SILVA, E. R. Caracterização da Formação de Cheias na Bacia do Rio Una em Pernambuco: Simulação Hidrológica-Hidrodinâmica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 394-403, 2015.

RIBEIRO, A. A. S.; OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J.A.; ALVES, F. H. B.; BAPTISTA, L. F. D. R.; MELO, V. B. Floodplain reconstitution based on data collected via smartphones: a methodological approach to hydrological risk mapping. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, n. 41, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190179>.

RIGHETTO, A. M. **Hidrologia e Recursos Hídricos**. 1. ed. São Carlos: EESC/USP, 1998. 840 p. ISBN 85-85205-24-5.

ROLNIK, R. O sonho possível do povo oprimido nas vilas, filas, favelas. **Diálogos & debates da Escola Paulista de Magistratura**, n. 1, v. 5, p. 58-61, 2001.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo numérico: Aspectos Teóricos e Computacionais**. 2 ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996, 406p.

SAMELA, C.; ALBANO, R.; SOLE, A.; Manfreda, S. A GIS tool for cost-effective delineation of flood-prone areas. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 70, p. 43-52, 2018. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2018.01.013>

SAUERESSIG, S. R. **Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaquí – RS**. Mestrado em Geografia e Geociências da Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS), 2012.

SCORZINI, A. R.; RADICE, A.; MOLINARI, D. A New Tool to Estimate Inundation Depths by Spatial Interpolation (RAPIDE): Design, Application and Impact on Quantitative Assessment of Flood Damages. **Water**, v. 10, n. 12, 2018.

SHEPARD, D. A Two-Dimensional Interpolation Function for Irregularly-Spaced Data. **Proceedings of the 1968 ACM National Conference**, New York, 1968, p. 517-524. <http://dx.doi.org/10.1145/800186.810616>.

TRALLI, D. M.; BLOM, R. G.; ZLOTNICKI, V.; DONNELLAN, A.; EVANS, D. L. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 59, p.185-198, 2005.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Aspectos Institucionais do Controle das Inundações Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; MARQUES, D. M. L. M. (Orgs.). **Avaliação e Controle da Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, v. 2, p. 405-419, 2001.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia. Ciência e aplicação**. Editora da Universidade. ABRH: EDUSP. Porto Alegre. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. v. 4. 1993.

TUCCI, C. E. M. **Inundações Urbanas**. Porto Alegre: ABRH / RHAMA, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2005. 678 p. ISBN 85-7025-823-2

TUCCI, C. E. M.; VILLANUEVA, A. O. N. Flood control measures in Union da Vitoria and Porto Uniao: structural vs. Non-structural measures. **Urban Water**, v. 1, n. 2, p. 177-182, 1999. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00012-1](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00012-1)

TUNG, Y. Keynote lecture: Risk-Based design of flood defense system. In: PROCEEDINGS OF SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF FLOOD DEFENSE, Beijing, 2002. **Proceedings...** Beijing: 2002. p. 71-81.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. **Relatório de danos materiais e prejuízos decorrentes de desastres naturais no Brasil: 1995 – 2019**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres; Banco Mundial. Florianópolis: CEPED UFSC, 2020.

UN. United Nations. **World Population Prospects 2022: Summary of Results**. New York, NY, USA, 2022.

VICENTE-SERRANO, S. M.; SAZ-SÁNCHEZ, M. A; CUADRAT, J. M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. **Climate Research**, v. 24, n. 2, p. 161–180, 2003.

VIDAL, D. H. F. **Modelagem Hidrodinâmica como suporte a avaliação e proposição de alternativas compensatórias para mitigação dos problemas de cheias urbanas na Bacia do riacho Reginaldo em Maceió/AL**. Mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Rio de Janeiro, 2012.

WANG, K.; WU, Y.; FAN, Q. Construction of rainstorm security pattern based on waterlogging prevention and control: A case study on Zhengzhou City, **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 11, p. 8911-8918, 2022. <http://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.031>.

YALCIN, G.; AKYUREK, Z. Analysis Flood Vulnerable Areas with Multicriteria Evaluation. In: Proceedings of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, 10., 2004, Istanbul. **Proceedings...** Istanbul, 2004, p. 359-364.

YANG, T.; LIU, Z.; CHEN, Y.; YU, Y. Real-Time, Inexpensive, and Portable Measurement of Water Surface Velocity through Smartphone. **Water**, v.12, n.12, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123358>