



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LARISSA FERREIRA DAVID ROMÃO BATISTA

**QUADRO CONCEITUAL E ANALÍTICO COMO SUBSÍDIO AO MAPEAMENTO DE  
RISCO DECORRENTE DE INUNDAÇÃO**

Recife  
2021

LARISSA FERREIRA DAVID ROMÃO BATISTA

**QUADRO CONCEITUAL E ANALÍTICO COMO SUBSÍDIO AO MAPEAMENTO DE  
RISCO DECORRENTE DE INUNDAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto

Recife  
2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

B333q Batista, Larissa Ferreira David Romão  
Quadro conceitual e analítico como subsidio ao mapeamento de risco decorrente de inundação / Larissa Ferreira David Romão Batista. – 2021.  
128 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.  
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2021.  
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Modelagem hidrodinâmica 2D. 3. Vulnerabilidade.  
4. Curvas de dano. 5. Influência de reservatório. I. Ribeiro Neto, Alfredo (orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2022-80

**LARISSA FERREIRA DAVID ROMÃO BATISTA**

**QUADRO CONCEITUAL E ANALÍTICO COMO SUBSÍDIO AO  
MAPEAMENTO DE RISCO DECORRENTE DE INUNDAÇÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil, Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Aprovada em 27/08/2021

**BANCA EXAMINADORA**

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto (orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Carlos Ruberto Fragoso Junior (examinador externo)  
Universidade Federal de Alagoas

participação por videoconferência  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Rosa da Silva (examinadora externa)  
Universidade de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. Roberto Quental Coutinho (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência  
Prof. Dr. José Almir Cirilo (examinador interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. A CAPES, agradeço.

Agradeço à ciência por me apresentar a imensidão da existência.

À Universidade Federal de Pernambuco por ser espaço de conhecimento e crescimento, parte transformadora na vida de cada um que tenha tido a oportunidade de lá estudar.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil pela oportunidade.

Ao Grupo de Recursos Hídricos (GRH) pelo ambiente de trabalho e pela riqueza do conhecimento compartilhado.

Ao meu orientador, professor Dr. Alfredo Ribeiro Neto, pela parceria de tantos anos, sempre com muita escuta, apoio e direcionamento. Sua contribuição ativa é parte dos resultados alcançados.

Aos demais professores, em especial os do GRH e do PPGE/UFPE com os quais tive o prazer de interagir, muito obrigada por defenderem a nobre missão da educação.

A todos os funcionários da universidade, em especial à Secretaria do PPGE/UFPE pelo zelo, presteza e competência.

A todos que contribuem para a ciência em suas mais variadas áreas. Não se avança sozinho.

Aos meus familiares e amigos por serem.

Por fim, mas definitivamente não menos importante, muito pelo contrário, agradeço a todos os amigos cientistas. Os do início dessa caminhada, os que conheci já no final, os que estiveram ao longo de todos esses anos e aqueles com os quais convivi apenas por momentos breves. Levo comigo o conhecimento, mas acima de tudo levo em mim um pouco de cada um. Muito obrigada pelo encontro, pela troca e pela amizade.

A Deus, como quer que se conceba, pelo caminho.

## RESUMO

Risco é a probabilidade do desastre, que no contexto desta pesquisa estará relacionado a inundações, sendo também consequência da combinação de três fatores principais: perigo, exposição e vulnerabilidade. Entender o risco é o primeiro passo para diminuir seus impactos negativos. O Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015 – 2030) destaca a necessidade de monitoramento, avaliação, compreensão e comunicação do risco, suas causas e consequências para a gestão no enfrentamento dos desafios de hoje e de amanhã. A estrutura montada nesta pesquisa navega pelas etapas de uma análise de risco quantitativa, embasada principalmente em dados secundários, comunicando os resultados de modo gráfico e buscando diminuir a alta exigência por recursos financeiros e humanos. Propõe-se um banco de dados facilmente padronizado em ambiente SIG, a análise de influência de uma estrutura de controle de cheias (barragem de Serro Azul) na estimativa de danos residenciais, e a construção de curvas de risco em escala local com uma metodologia facilmente replicável para outros municípios da região. Foi realizada modelagem hidrológica (HEC-HMS) e hidrodinâmica 2D (HEC-RAS) para eventos de projeto. No que concerne à influência da barragem, os danos estimados referentes à estrutura das edificações residenciais atingiram redução máxima de 94%, enquanto danos a bens pessoais chegaram a um pico de 87%, ambos para eventos de inundação de maior frequência. Os benefícios anuais proporcionados pela barragem de Serro Azul, através da metodologia desta pesquisa, são estimados em 3,5 milhões de reais ao ano apenas para o setor residencial. Os mapas apresentados traduzem graficamente os valores obtidos com os indicadores sendo reclassificados em categorias facilmente reconhecíveis e comparáveis.

**Palavras-chave:** Modelagem hidrodinâmica 2D; vulnerabilidade; curvas de dano; influência de reservatório.

## ABSTRACT

Risk is the probability of a disaster, which in the context of this research will be related to floods, and is also a consequence of the combination of three main factors: hazard, exposure, and vulnerability. Understanding risk is the first step in mitigating its negative impacts. The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015 – 2030) highlights the need to monitor, assess, understand and communicate risk, its causes, and consequences for management in facing the challenges of today and tomorrow. The structure set up in this research navigates through the stages of quantitative risk analysis, based mainly on secondary data, communicating the results graphically and seeking to reduce the high demand for financial and human resources. We propose an easily standardized database in a GIS environment, the analysis of a flood control structure's influence in the estimation of residential damage (Serro Azul dam), and the construction of easily replicable local-scale risk curves. Hydrological (HEC-HMS) and 2D hydrodynamic (HEC-RAS) modeling were performed for design events. Concerning the influence of the dam, the estimated damages referring to the structure of residential buildings reached a maximum reduction of 94%, while damage to the inventory reached a peak of 87%, both for the most frequent flood events. Through the methodology of this research, Serro Azul provided estimated annual benefits of BRL\$ 3.5 million per year for the residential sector alone. The maps graphically translate the values obtained with the indicators reclassified into easily recognizable and comparable categories.

**Keywords:** 2D hydrodynamic modeling; vulnerability; damage curves; reservoir influence.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                            |     |
|-------------|------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 1 –  | Ocorrência por tipo de desastre                            | 28  |
| Figura 2 –  | Quantidade de pessoas afetadas por tipo de desastre        | 28  |
| Figura 3 –  | Inundação de 1975, Ilha do Retiro, Recife, Pernambuco      | 30  |
| Figura 4 –  | Inundação 2010, município de Palmares, Pernambuco          | 31  |
| Figura 5 –  | Ilustração da implantação de barragens na bacia do rio Una | 32  |
| Figura 6 –  | Organograma conceitual                                     | 34  |
| Figura 7 –  | Cálculo de benefícios de medidas de controle de inundação  | 58  |
| Figura 8 –  | Organograma da metodologia                                 | 60  |
| Figura 9 –  | Mapa de localização da bacia do rio Una                    | 61  |
| Figura 10 – | Mapa de localização de Palmares                            | 65  |
| Figura 11 – | Alocação das equações IDF na bacia do rio Una              | 68  |
| Figura 12 – | Interface do aplicativo DataScope (formulários)            | 79  |
| Figura 13 – | Normalização dos indicadores de vulnerabilidade            | 81  |
| Figura 14 – | Malha para simulação 2D no HEC-RAS                         | 86  |
| Figura 15 – | Comparativo de manchas de inundação                        | 89  |
| Figura 16 – | Comparativo de manchas de inundação para diferentes TRs    | 90  |
| Figura 17 – | Hidrogramas simulados com o modelo HEC-RAS                 | 93  |
| Figura 18 – | Manchas de inundação simuladas com o modelo HEC-RAS        | 94  |
| Figura 19 – | Vetorização de lotes e quadras                             | 95  |
| Figura 20 – | Google Street View x Fotos in loco                         | 96  |
| Figura 21 – | Indicadores o número de unidades residenciais              | 98  |
| Figura 22 – | Curvas para o conjunto de limiares 01                      | 103 |
| Figura 23 – | Curvas para o conjunto de limiares 02                      | 104 |
| Figura 24 – | Mapas de perigo (com barragem)                             | 106 |
| Figura 25 – | Mapas de exposição                                         | 107 |
| Figura 26 – | Indicadores de vulnerabilidade (Setores censitários)       | 108 |
| Figura 27 – | Indicadores de vulnerabilidade (Lotes)                     | 109 |
| Figura 28 – | Mapas de risco (limiar 01)                                 | 111 |
| Figura 29 – | Mapas de risco (limiar 02)                                 | 112 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                  |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 –  | Grau de influência dos indicadores de perigo em diferentes danos | 48  |
| Tabela 2 –  | Tipologias adotadas para caracterização de residências MG        | 57  |
| Tabela 3 –  | Limiars dos indicadores de perigo                                | 70  |
| Tabela 4 –  | Custo Unitário Básico (PE, Jan 2021)                             | 73  |
| Tabela 5 –  | Características principais dos projetos-padrão                   | 73  |
| Tabela 6 –  | Porcentagem da edificação danificada (PED)                       | 74  |
| Tabela 7 –  | Itens do conteúdo da residência padrão                           | 75  |
| Tabela 8 –  | Fator multiplicador dos conteúdos do imóvel padrão (Fm)          | 77  |
| Tabela 9 –  | Vazões máximas simuladas para calibração em Palmares             | 85  |
| Tabela 10 – | Vazões máximas simuladas no HEC-HMS para Palmares                | 92  |
| Tabela 11 – | Vazões máximas simuladas no HEC-RAS para Palmares                | 92  |
| Tabela 12 – | Limiars de área para classificação de padrões construtivos       | 98  |
| Tabela 13 – | Custo Unitário Básico – PB – Jun2010                             | 100 |
| Tabela 14 – | Estimativa de danos à estrutura das residências                  | 101 |
| Tabela 15 – | Estimativa de danos ao conteúdo das residências                  | 102 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|         |                                                                  |
|---------|------------------------------------------------------------------|
| AHP     | Analytic Hierarchy Process                                       |
| AIC     | Área inundada construída                                         |
| ANA     | Agência Nacional de Águas                                        |
| APAC    | Agência Pernambucana de Águas e Clima                            |
| AVADAN  | Formulário de Avaliação de Danos                                 |
| CBA     | Análises custo-benefício                                         |
| CEMADEN | Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais |
| COBRADE | Codificação Brasileira de Desastres                              |
| CRE     | Custo dos danos à edificação das residências                     |
| CRED    | Centre for Research on the Epidemiology of Disasters             |
| CUB     | Custo Unitário Básico                                            |
| DPS     | Curvas dano vs profundidade de submersão                         |
| EAD     | Estimated Annual Damage                                          |
| EDQ     | Expert-Driven Qualitative                                        |
| EQP     | Erro percentual da vazão de pico                                 |
| FEMA    | Federal Emergency Management Agency                              |
| GSV     | Google Street View                                               |
| GUI     | Interface gráfica do usuário                                     |
| HAND    | Height Above the Nearest Drainage                                |
| HEC     | Hydrologic Engineering Center                                    |
| HEC-HMS | Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System       |
| HEC-RAS | Hydrologic Engineering Center's River Analysis System            |
| IDF     | Curvas intensidade-duração-frequência                            |
| IESI    | Integrated Earthquake Safety Index                               |
| IPCC    | Intergovernmental Panel on Climate Change                        |
| JRC     | Joint Research Centre                                            |
| LiDAR   | Light Detection and Ranging                                      |
| MAVEN   | Monitor Avançado de Enchentes                                    |
| NOPRED  | Formulário de Notificação Preliminar de Desastre                 |
| PCD     | Plataforma de Coleta de Dados                                    |
| PE3D    | Programa Pernambuco Tridimensional                               |
| PED     | Porcentagem da edificação danificada                             |

|         |                                                                |
|---------|----------------------------------------------------------------|
| PERH-PE | Plano Estadual de Recursos Hídricos                            |
| PNGRD   | Plano Nacional de Gestão Risco e Resposta a Desastres Naturais |
| SFDRR   | Sendai Framework for Disaster Risk Reduction                   |
| SINDEC  | Sistema Nacional de Defesa Civil                               |
| SPI     | Standardized Precipitation Index                               |
| SRHE-PE | Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco    |
| Tr      | Tempo de retorno                                               |
| UCL     | Université of Catolique de Louvain                             |
| USACE   | U.S. Army Corps of Engineers                                   |
| WHO     | World Health Organization                                      |

## SUMÁRIO

|              |                                                  |           |
|--------------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                | <b>13</b> |
| 1.1          | HIPÓTESE                                         | 16        |
| 1.2          | OBJETIVOS                                        | 17        |
| 1.3          | JUSTIFICATIVA                                    | 17        |
| <b>2</b>     | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>                       | <b>20</b> |
| 2.1          | INUNDAÇÃO EM NÚMEROS                             | 20        |
| 2.2          | PLANO DE GESTÃO DE RISCO E AÇÕES                 | 25        |
| 2.3          | CONCEITOS, COMPONENTES E ANÁLISES DO RISCO       | 27        |
| 2.4          | ELEMENTOS DO RISCO                               | 33        |
| 2.5          | MODELAGEM E MODELOS                              | 37        |
| 2.6          | ANÁLISES DE DANOS                                | 41        |
| <b>2.6.1</b> | <b>Panorama mundial</b>                          | <b>42</b> |
| <b>2.6.2</b> | <b>Panorama nacional</b>                         | <b>46</b> |
| <b>2.6.3</b> | <b>Curva probabilidade-dano</b>                  | <b>51</b> |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA</b>                               | <b>54</b> |
| 3.1          | ÁREA DE ESTUDO                                   | 55        |
| 3.2          | MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA            | 59        |
| 3.3          | ANÁLISE DE DANOS                                 | 65        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Equações</b>                                  | <b>65</b> |
| <b>3.3.2</b> | <b>Cadastro</b>                                  | <b>71</b> |
| 3.4          | DADOS CENSITÁRIOS NA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE  | 73        |
| 3.5          | ÍNDICE DE RISCO                                  | 75        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                    | <b>77</b> |
| 4.1          | MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA            | 77        |
| <b>4.1.1</b> | <b>Chuvas e calibração do HEC-HMS</b>            | <b>77</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Calibração do HEC-RAS</b>                     | <b>79</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Contribuição da barragem (picos de vazão)</b> | <b>84</b> |
| 4.2          | CADASTRO                                         | 89        |
| 4.3          | ANÁLISE DE DANOS APLICADA À INUNDAÇÃO DE 2010    | 93        |
| 4.4          | ANÁLISES DE DANOS E CURVAS                       | 94        |
| 4.5          | MAPAS DOS ELEMENTOS DO RISCO                     | 99        |

|          |                                                               |            |
|----------|---------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                             | <b>108</b> |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                                            | <b>112</b> |
|          | <b>APÊNDICE A – ESTRUTURA DO BANCO DE DADOS<br/>CADASTRAL</b> | <b>125</b> |
|          | <b>APÊNDICE B – ESTRUTURA DOS FORMULÁRIOS</b>                 | <b>126</b> |
|          | <b>APÊNDICE C – MEMORIAL DE CAMPO</b>                         | <b>127</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O risco enquanto construção social forma-se da tentativa humana de apropriação da realidade através de conceitos. Complexidade, incertezas e diferentes percepções são apenas alguns dos fatores que tornam o risco elemento tão amplo e, por vezes, difícil de ser definido. Destaca-se na literatura a necessidade da consciência e apropriação do mesmo para a imprescindível mudança de paradigmas relacionados ao tema. No contexto mundial atual de incertezas e emergências climáticas, a tentativa do controle de eventos extremos transforma-se de modo que discussões antes acerca de resistência e proteção passam a ser sobre resiliência e gestão (ROOS et al., 2017).

Ao redor do mundo, num período de dez anos, o número de pessoas mortas devido a desastres chegou a atingir a casa dos milhares. Entre feridos e desabrigados foi possível contabilizar milhões. A soma dos indivíduos afetados das mais diversas formas por eventos desastrosos chega aos bilhões, e as perdas econômicas aos trilhões. É crítica e urgente a necessidade de planejamento, antecipação e redução dos riscos de desastres. O enfrentamento dos desafios atuais e futuros é feito com monitoramento, avaliação, compreensão e comunicação do risco, suas causas e consequências. E tudo isso passa por uma boa governança, preparada para agir antes, durante e depois (UNISDR, 2015).

O Hyogo Framework for Action (2005 - 2015) e o Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015 – 2030) surgem da busca pela redução substancial dos riscos de desastre e das perdas, através da promoção de medidas integradas e inclusivas. Os objetivos do Sendai Framework são a redução global da mortalidade, do número de pessoas afetadas por desastres, das perdas econômicas diretas, e dos danos a infraestruturas e serviços básicos, além da promoção do aumento no número de países com estratégias locais e nacionais de redução de risco, da cooperação internacional de apoio a países em desenvolvimento, da disponibilidade a sistemas de alerta e da acessibilidade à informação (UNISDR, 2015).

O Sendai Framework destaca a necessidade do entendimento das características locais específicas para o desenvolvimento de medidas de redução de riscos de desastres, enquanto afirma a necessidade de colaboração em diferentes escalas e setores quando da aplicação de ações. As quatro prioridades definidas são o entendimento do risco, o fortalecimento da governança, o investimento para a

resiliência, e o aumento do preparo para respostas mais efetivas (“Build Back Better”, recuperação, reabilitação e reconstrução). O crescimento constante do risco de desastre, e conseqüentemente da exposição de pessoas e ativos, somados a experiência de eventos passados indica a necessidade de fortalecer a preparação para a resposta, ou seja, agir em antecipação aos eventos (UNISDR, 2015).

No Brasil, destaca-se o trabalho das defesas civis frente a cenários de desastre relacionados a fenômenos naturais, em nível municipal. No entanto, em todo o país, aplica-se muito mais a gestão do desastre que a gestão do risco. O registro de situações de calamidade pública, por exemplo, é bastante comum. Já medidas de gerenciamento de inundações são mais raras, mesmo na iminência da ocorrência de tais fenômenos. A incorporação do risco de dano ao planejamento de medidas de controle de inundações é essencial ao desenvolvimento de uma gestão mais eficiente (FADEL et al., 2018a).

É importante entender que a gestão pode exercer influência significativa nos impactos de um desastre. Fatores como burocracia, descontinuidade de políticas públicas, incompatibilidade entre escalas de atuação e falta de cooperação entre as partes interessadas são algumas das dificuldades na estruturação da gestão (TANWATTANA, 2018). Somado a isso, o desafio da gestão deve ainda absorver mudanças de origem antrópica como degradação ambiental, escassez de recursos e urbanização acelerada (JAHANGIRI et al., 2017).

As análises de risco têm sido cada vez mais reconhecidas como etapas necessárias à gestão. Abordagens que integrem aspectos econômicos, ecológicos e de engenharia são os mais indicados. Essas análises devem abranger definição de perigo, exposição e avaliação de danos econômicos, para o caso de estudos quantitativos (WHELCHER et al., 2018). Estimativas atualizadas e precisas do potencial de perdas originadas de desastres contribuem significativamente para a compreensão do risco, implementação de medidas de mitigação e planejamento emergencial pós-desastre, ou seja, para o desenvolvimento sustentável de uma região (McGRATH et al., 2015).

Enquanto método padrão internacionalmente aceito para avaliação de danos diretos em áreas urbanas, as funções profundidade-dano são modelos simplificados. No caso da ausência de dados, a transferência e aplicabilidade desses modelos entre diferentes regiões geográficas são possíveis, mas problemáticas. Tais modelos devem ser selecionados apenas de lugares que compartilhem semelhanças nos

aspectos construtivos, geográficos e ambientais (CAMMERER et al., 2013). Mesmo assim, estudos recentes apontam a preferência pela criação de funções mais simples baseadas em dados locais ao invés de modelos retirados da literatura e de contextos diferentes (ARRIGHI et al., 2020).

A estimativa de danos diretos é assim tarefa de extrema relevância e difícil execução. As funções são únicas para cada tipo de edificação e ainda muito escassas no Brasil, principalmente as empíricas, baseadas em dados levantados in loco pós-evento como destacam Almeida & Eleutério (2019):

“Há diversas oportunidades para melhorias na compreensão e no detalhamento dos processos que geram danos e na sua quantificação. Essas incluem precisão na determinação dos valores de objetos expostos, na compreensão detalhada dos padrões de danos por patologias e na melhoria da classificação e detalhamento das categorias de elementos em risco. A atualização e ou construção de curvas de danos mais precisas aparece como outro ponto fundamental para possibilitar avaliações mais fidedignas. Por fim, a escassez de curvas de danos construídas em contexto nacional ressalta uma forte perspectiva de pesquisa sobre o tema.”

Em Pernambuco, de todos os eventos registrados, a inundação de 2010 foi um dos mais desastrosos, impulsionando o surgimento de estudos sobre o tema na região, assim como medidas principalmente no nível da gestão. No meio acadêmico, pesquisas foram produzidas na busca por entender as dinâmicas desses eventos, através de uma abordagem analítica de seus principais componentes, propondo e aprimorando ferramentas de suporte à decisão. O referencial teórico para Pernambuco, especialmente para a região da Zona da Mata Sul, é vasto.

Dantas (2012) propõe a proteção das cidades através do conhecimento do padrão de ocorrência das inundações mais severas da bacia do rio Una e do aprimoramento da previsão e controle de inundações com informações espaciais de alta resolução. Fragoso (2013) avalia a relação entre as consequências de desastres com as condições socioeconômicas da população e políticas públicas de uso e

ocupação do solo, no município de Palmares. Oliveira (2015) analisa o desenvolvimento de aspectos relacionados à resiliência após as inundações de 2010 e 2011, através do contato com moradores. Silva (2015) organiza um sistema de apoio a emergências para o caso de enchentes, usando estrutura computacional e unindo informações meteorológicas, hidrológicas e hidrodinâmicas. Alves (2017) busca aperfeiçoar sistemas de previsão em eventos de chuvas extremas para suporte à gestão de riscos. Ferraz (2019) define como a operação de barragens e reservatórios pode influenciar no controle de cheias de uma bacia da Zona da Mata Sul. E Lima Neto (2019) realiza modelagem hidrológica e hidrodinâmica com dados sub-diários, identificando deficiências e aprimorando simulações referentes a inundações na bacia do rio Una.

O presente trabalho propõe uma estrutura de análise com ferramentas e dados acessíveis, aprimorando etapas, facilitando o operacional e possibilitando o desenvolvimento de curvas de risco de inundação em escala local. Uma metodologia embasada principalmente em dados secundários, buscando anular a sempre alta exigência por recursos financeiros e humanos. Representa-se o cenário urbano de maneira mais precisa com um cadastramento lote a lote através do aplicativo Google Street View e faz-se um estudo da classificação dos padrões construtivos que interferem de modo direto no quantitativo de danos estimados. Além disso, é realizada análise quantitativa da influência da barragem de Serro Azul na redução dos picos de vazão e conseqüentemente sua contribuição para a mitigação dos danos referentes ao setor residencial do município de Palmares.

Esta pesquisa foi desenvolvida em cinco partes. O primeiro capítulo abrange de modo mais geral o tema de trabalho, introduzindo, justificando e enumerando os objetivos do estudo. O segundo capítulo estabelece o referencial teórico de conceitos e assuntos base. O terceiro capítulo detalha a área de estudo e a metodologia utilizada. O quarto capítulo discute os resultados e o quinto conclui a pesquisa.

## 1.1 HIPÓTESE

Por anos, pesquisadores têm exposto dificuldades para a realização de análises quantitativas de risco de inundação, seja pela falta de dados ou de recursos. Diante da quantidade de tecnologias e dados secundários atualmente

disponíveis, supõe-se ser possível estabelecer e executar uma metodologia completa, ao ponto da criação de curvas de risco em escala local.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral da tese é estabelecer um quadro conceitual e analítico para realização completa de análises de risco de inundação em escala local, sob a ótica da engenharia, para cenários de escassez de dados, recursos financeiros e humanos, propondo atualizações e preenchendo lacunas.

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Priorizar o uso de dados secundários no mapeamento de risco de inundação;
- Sistematizar o cadastramento e classificação de elementos expostos na escala do lote, com foco nas residências;
- Analisar a influência da barragem de Serro Azul nas vazões e nos danos;
- Desenvolver curvas de danos e de risco.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

O tema aqui abordado tem sido objeto de trabalho da autora já há vários anos por escolha e gosto. Sua relevância tem tido cada vez mais destaque devido a crescente frequência e magnitude de desastres relacionados a inundações principalmente no contexto das mudanças climáticas (ALBANO et al., 2017). A escolha do município de Palmares enquanto área de aplicação do estudo é baseada na ampla base teórica e prática desenvolvida por pesquisadores do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE para essa região. Assim, busca-se pular etapas aproveitando o conhecimento já construído para avançar em outras partes do tema apresentado.

O Sendai Framework for Disaster Risk Reduction, das Nações Unidas, um dos documentos mais importantes da área, encoraja investimento e desenvolvimento de pesquisas focadas em soluções para preencher lacunas, interdependências e desafios sociais. O direcionamento de metodologias para análises, modelagem e uso de dados, e a promoção de pesquisas em padrões e áreas prioritárias para a redução de risco. Destacam-se ações como coleta, análise,

gestão e uso de dados relevantes, assegurando sua disseminação e considerando as necessidades específicas das diferentes partes interessadas. No que concerne a perdas, incentiva-se de modo sistemático a avaliação, registro, compartilhamento, contabilização e compreensão das heranças dos impactos, além do uso de informações espaciais e in situ, incluindo sistemas de informações geográficas e tecnologia da informação (UNISDR, 2015; IZUMI et al., 2019).

A ideia de um framework, quadro conceitual e analítico, busca unir métodos existentes de uma teoria já amplamente discutida, mas que por vezes se limita na prática devido à escassez de alguns recursos (FADEL et al., 2018b). Através da grande quantidade de tecnologias e dados geográficos atualmente disponíveis busca-se concretizar uma abordagem detalhada e viável para um país com dimensões e problemas continentais. É, portanto, priorizado o uso de dados secundários além da aplicação de métricas normativas e ferramentas técnicas acessíveis que visam possibilitar a replicação do processo completo em escala municipal. A inovação está não em um produto, mas numa abordagem de busca por preencher lacunas que interferem diretamente na gestão de riscos (IZUMI et al., 2019).

A avaliação econômica dos impactos de uma inundação tem relevância por sua atuação ativa em questões como a compreensão das dinâmicas de um desastre, o mapeamento de populações expostas, o planejamento de ações preventivas, a otimização da gestão, a previsão orçamentária de medidas de controle de cheias, o reordenamento do uso do solo, e principalmente a mitigação de danos. Existe muito espaço para aprimoramento da compreensão e detalhamento dos processos formadores do dano, assim como em sua análise e quantificação. A busca por curvas mais precisas que possam melhor representar a realidade local é ponto chave nesse processo. A escassez de curvas nacionais ainda é uma realidade (ALMEIDA & ELEUTÉRIO, 2019).

Considerando que o conhecimento acerca do risco diminui seu impacto, a gestão de desastres deve estar voltada à identificação de ameaças, à promoção de ações de prevenção e preparo, e conseqüentemente à mitigação de danos (GONZÁLEZ et al., 2018). Fazer com que a gestão e conseqüentemente a população priorizem medidas de redução de risco, especialmente prevenção, sem que tenham tido a experiência de um desastre é tarefa difícil. As análises de risco nesse caso podem interferir diretamente em aspectos como aceitação social,

vontade política e disponibilidade de recursos financeiros, por exemplo. Destaca-se assim a responsabilidade dos cientistas em condensar informações de modo mais acessível à visualização e interpretação das partes interessadas (BARQUET & CUMISKEY, 2018).

## 2 REFERENCIALTEÓRICO

Onde há um rio, há a possibilidade de inundação. Do encontro do rio com uma comunidade, população, ou sistema, surge o conceito do risco, tema popular de literatura ampla. O que há de novo então na temática do risco de inundação e consequentemente do risco de desastre? A mudança de paradigmas. Ao entender as diferentes parcelas formadoras do desastre pode-se evitá-lo. Como destacado pelo Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (2015 – 2030), os desafios de hoje e de amanhã devem ser enfrentados com monitoramento, avaliação, compreensão e comunicação do risco, suas causas e consequências. O capítulo a seguir trata de um referencial bibliográfico que explora os diferentes elementos formadores de uma análise de risco no contexto da engenharia civil.

### 2.1 INUNDAÇÃO EM NÚMEROS

Historicamente, os assentamentos humanos sempre tiveram preferência por áreas próximas a corpos d'água pelas facilidades de abastecimento, irrigação e transporte, por exemplo. Esses agrupamentos, inicialmente pequenos, tornaram-se o que hoje conhecemos por cidades (TURRERO et al., 2013). No entanto, a ocupação cada vez maior e não planejada de regiões conhecidas como várzeas inundáveis, paralelamente às tendências climáticas atuais, favorece a origem e progressão de desastres relacionados a inundações (ABEBE et al., 2018; SAHARIA et al., 2017).

Para compreensão do cenário em escala mundial, destaca-se o trabalho do Centro para Pesquisa em Epidemiologia de Desastres (CRED, do inglês Centre for Research on the Epidemiology of Disasters). O CRED é uma instituição sem fins lucrativos, criada em 1973 e localizada na Escola de Saúde Pública da Université Catholique de Louvain (UCL). Tornou-se um centro de colaboração da Organização Mundial da Saúde (WHO, do inglês World Health Organization) e desde 1988 mantém o EM-DAT. Nessa base são registrados eventos que atendam a, pelo menos, um dos seguintes critérios (CRED, 2020):

- 10 ou mais pessoas relatadas como mortas
- 100 ou mais pessoas relatadas como afetadas
- Declaração de estado de emergência

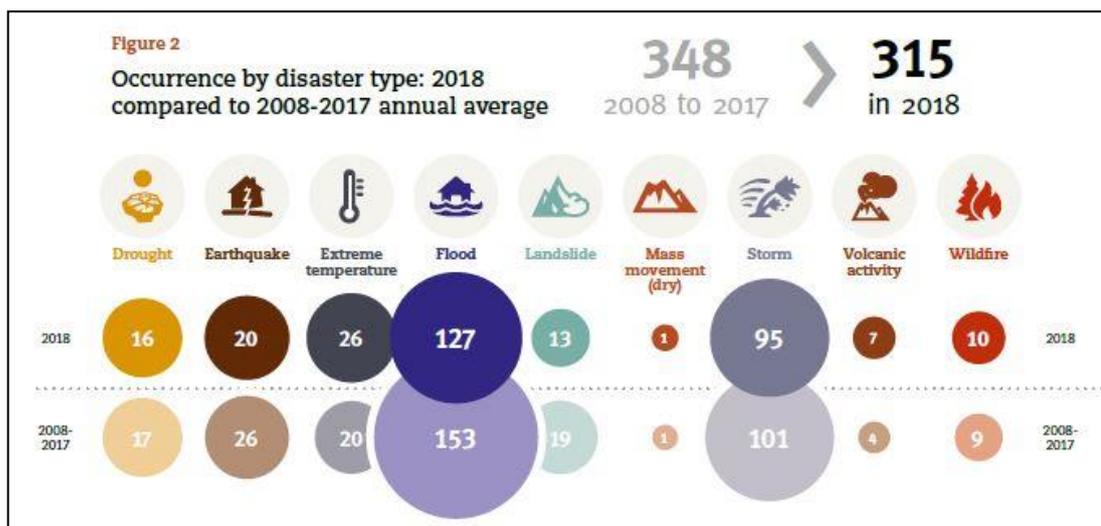
- Solicitação de ajuda internacional

Anualmente, o CRED divulga relatório sintetizando informações acerca de desastres relacionados a fenômenos naturais. São listas e gráficos que compilam quantidade de eventos extremos por tipo, local de ocorrência, número de pessoas afetadas, número de pessoas mortas, dimensão monetária dos prejuízos, dentre outros. Inundações sempre têm grande destaque nesses relatórios. Em 2016, inundações estiveram entre os dez eventos com maior número de mortes e os dez desastres que mais produziram prejuízos econômicos (GUHA-SAPIR et al., 2016).

Em 2017, atingiram primeiro lugar no ranking de desastre com maior número de mortes e desastre com maior quantidade de pessoas afetadas. Nesse mesmo ano, as inundações foram o segundo tipo de desastre que mais produziu perdas econômicas e com maior número de ocorrências, perdendo apenas para tempestades. No mês de agosto, uma única inundações foi responsável por matar 834 pessoas e afetar aproximadamente 27 milhões na Índia, Nepal e Bangladesh. Nessa região foram identificadas 450 milhões de habitantes potencialmente expostos (CRED, 2018).

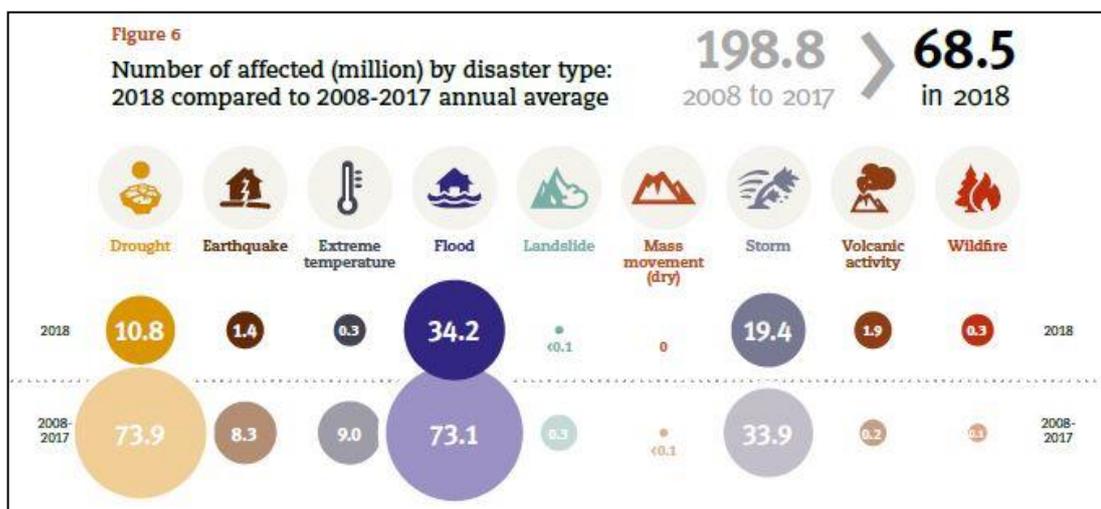
Em 2018, as inundações foram o tipo de desastre com o maior número de ocorrências (Figura 1), segundo maior número de mortes, maior número de pessoas afetadas (Figura 2) e terceiro maior produtor de prejuízos econômicos, perdendo para tempestades e incêndios. O maior evento de inundações do ano ocorreu no estado de Kerala, Índia. 504 pessoas morreram e 23 milhões foram afetadas, o equivalente a dois terços da população estadual. Na Nigéria outro evento matou 300 pessoas e afetou dois milhões de habitantes. No Japão fortes chuvas produziram as inundações mais mortais desde 1982, matando 230 pessoas. O relatório de 2018 destaca como as inundações foram os eventos extremos que mais afetaram pessoas no século XXI (CRED, 2019).

Figura 1: Ocorrência por tipo de desastre



Fonte: CRED (2019).

Figura 2: Quantidade de pessoas afetadas (milhões) por tipo de desastre



Fonte: CRED (2019).

Outro documento é o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais, publicado pelo Ministério da Integração Nacional, que em 2013 trouxe a Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE). Tal codificação foi elaborada com base no sistema utilizado pelo EM-DAT do CRED, adequando a classificação brasileira aos padrões internacionais da ONU e simplificando a metodologia antes existente. Em 2013, inundações foram responsáveis por 36 óbitos, 1461 feridos, mais de 59 mil desabrigados e mais de 200 mil desalojados, somando aproximadamente 1,4 milhão de pessoas afetadas (ANUÁRIO, 2013).

Inundações também são eventos comuns e recorrentes na história de Pernambuco. O primeiro registro data do ano de 1632 e a primeira barragem, construída por Maurício de Nassau para proteção da capital Recife, é erguida em 1638. Com uma lacuna nos dados abrangendo todo o século XVIII, o próximo evento só será registrado em 1842 quando se tem a primeira grande inundação do Estado. E em 1854 a maior inundação daquele século, durando 72 horas, causando danos severos à capital Recife. No século XX, um aumento no número de eventos extremos é notado. Em 1975 (Figura 3) é registrada a maior inundação daquele século, com 25 municípios atingidos e 80% da cidade do Recife coberta pelas águas (GOETHE, 2016; BATISTA et al., 2017; PERNAMBUCO, 2010).

Em 2000, entre os dias 30 de julho e 1 de agosto choveu 300 mm e a inundação consequente resultou em 22 pessoas mortas, 100 feridas e mais de 60 mil desabrigadas. 33 municípios foram atingidos, com 16 decretando estado de emergência e 17 de calamidade. Em 2004, fortes chuvas atípicas nos primeiros meses do ano resultaram em 36 pessoas mortas e aproximadamente 20 mil desabrigadas. Na ocasião, 13 municípios decretaram calamidade pública e 76 decretaram estado de emergência. Pontes, casas e estradas destruídas, cidades isoladas, açudes e barragens transbordando no sertão e um prejuízo total de R\$ 54 milhões. No ano de 2005 as inundações ocorreram entre os dias 30 de maio e 02 de junho, atingindo 25 cidades no Agreste, Zona da Mata e Litoral de Pernambuco. Foram contabilizadas 36 mortes e mais de 30 mil pessoas desabrigadas. Mais uma vez, pontes, rodovias, casas e edifícios públicos foram danificados, resultando em interdição de tráfego e interrupção das atividades (DANTAS, 2012; ALVES, 2017; FERRAZ, 2019).

Figura 3: Inundação de 1975, bairro da Ilha do Retiro, Recife, Pernambuco



Fonte: QUARENTA (2015).

Em 2010 ocorreu o maior evento hidrológico já registrado na bacia do rio Una (Figura 4). No dia 17 de junho, um fenômeno climático conhecido como “Onda de Leste”, chegou ao Estado de Pernambuco intensificado pelo aquecimento da temperatura do Oceano Atlântico e de fortes ventos alísios. Essa combinação resultou em uma grande concentração de chuva num curto espaço de tempo e consequentemente em ondas de cheia nas bacias dos rios Una e Mundaú. Em um dia choveu o equivalente a 70% do esperado para o mês inteiro. A inundação provocada atingiu 67 cidades em Pernambuco e 19 em Alagoas, com pouco mais de 280 mil pessoas afetadas em ambos os estados. Um total de 102.420 pessoas desalojadas e 79 mortes. Foram contabilizadas 14.136 casas, 403 escolas, 4.478 km de estradas, 142 pontes, 2 hospitais estaduais, 85 postos de saúde, 4 hospitais municipais danificados ou destruídos. 27 municípios decretaram estado de emergência e 17 decretaram calamidade (PERNAMBUCO, 2010; DANTAS, 2012; ALVES, 2017; BATISTA et al., 2017).

Em 2011, entre os dias 3 e 5 de maio, menos de um ano depois do desastre de 2010, a região é novamente atingida por novos ciclos de cheia. Mesmo não tendo o poder de destruição do evento anterior, ainda assim a inundação atingiu 55 cidades, com 26 decretando emergência e 9 decretando calamidade. Em 2017, mais uma vez pessoas (46.131) acabam desalojadas ou desabrigadas, e casas (5.276) acabam danificadas ou destruídas em decorrência de inundações (DANTAS, 2012; ALVES, 2017; FERRAZ, 2019).

Figura 4: Inundação 2010, município de Palmares, Pernambuco



Fonte: CRUZ (2010).

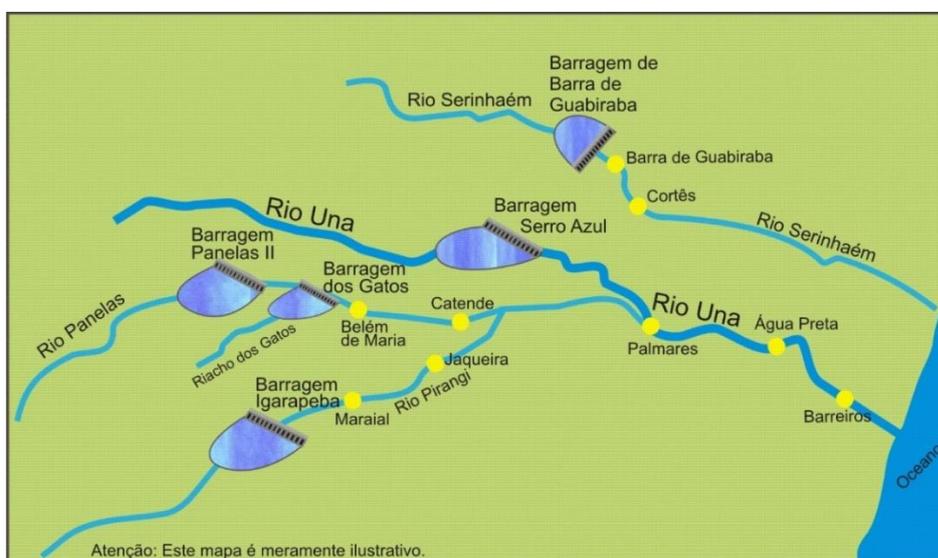
## 2.2 PLANO DE GESTÃO DE RISCO E AÇÕES

Danos causados por desastres são uma realidade brasileira secular. No âmbito da gestão existe uma cultura de ações emergenciais pós-evento. No entanto, a recorrência das tragédias ao longo dos anos deixou clara a necessidade de políticas públicas que promovessem de forma eficiente medidas de prevenção e redução de riscos. Dessa forma, foi criado em 1988 o Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC), com o objetivo de diminuir os impactos de eventuais desastres nos 3 níveis de governo (federal, estadual e municipal), atuando em estratégias de prevenção, preparação, resposta e reconstrução. Outro órgão criado também neste contexto foi o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) que desde 2011 busca desenvolver sistema de previsão de desastres para áreas de risco em todo o país (FRAGOSO, 2013).

Além disso, existe no Brasil o Plano Nacional de Gestão de Risco e Resposta a Desastres Naturais (PNGRD), que busca promover o fortalecimento de características como resiliência e capacidade de respostas das cidades quando em condição de estresse ocasionado por desastres. Tal plano foi lançado no ano de 2012 pelo governo federal, numa iniciativa de garantir a segurança de populações expostas. À União cabe a responsabilidade da legislação das ações contra calamidades públicas, a esfera estadual cuida das atividades mais ligadas à defesa civil e os municípios ficam com o planejamento de uso do solo e ações diretas na ocorrência de inundações (OLIVEIRA, 2015).

Em Pernambuco especificamente após o desastre de 2010 os prejuízos foram contabilizados em mais de R\$ 3 bilhões (OLIVEIRA, 2015). O governo estadual por meio da Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (SRHE-PE) contratou serviços de mapeamento digital a laser de alta precisão (Light Detection and Ranging, LiDAR). Esse material tornou viável a execução do PE3D (Programa Pernambuco Tridimensional) com levantamento de uma faixa de 1600 m abrangendo o rio ao centro e a área urbana das cidades atingidas. Hoje gerido pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), o programa teve por objetivo a criação de uma base de apoio à gestão com produtos de alta resolução (ortofotos, modelos digitais de terreno e elevação) (CIRILO et al., 2015). Tais produtos tiveram influência direta no projeto de algumas das barragens do Sistema Integrado de Contenção de Cheias da região (Figura 5).

Figura 5: Ilustração da implantação de barragens na bacia do rio Una



Fonte: PERNAMBUCO (2011).

Outra medida tomada foi o estabelecimento da Sala de Situação da APAC, em 2011, na qual funciona o Sistema de Previsão e Alerta de Eventos Hidrometeorológicos Críticos do Estado, buscando otimizar a capacidade de resposta a eventos climáticos extremos. Tal sistema foi implantado em cooperação com a Agência Nacional de Águas (ANA) e contém Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) localizadas estrategicamente, trabalhando na transmissão automática de informações de chuva e nível da água dos rios (DANTAS, 2012).

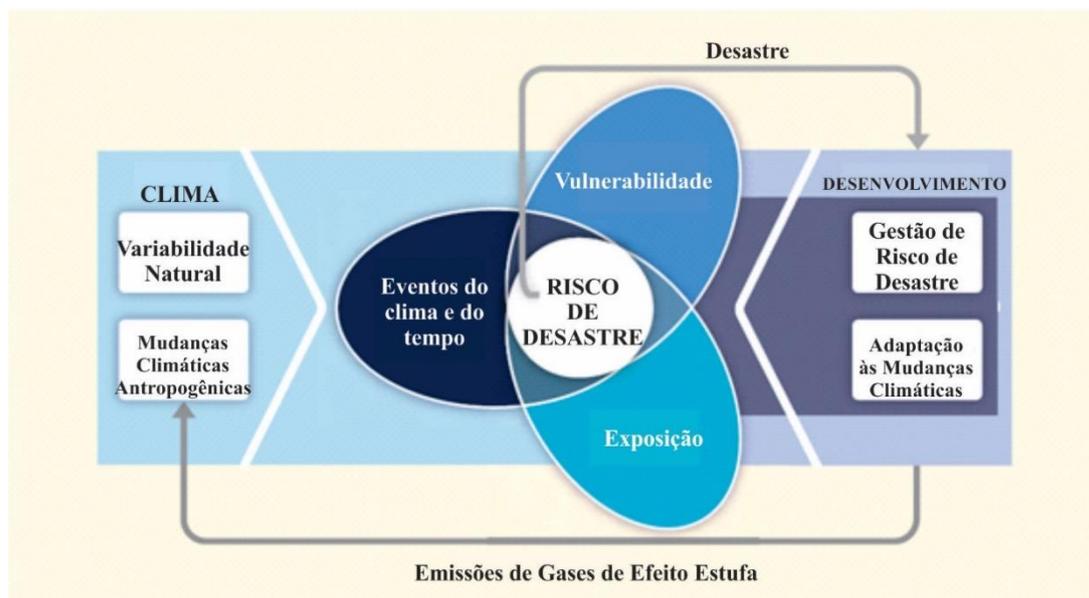
No âmbito legal algumas ferramentas podem ser citadas como os Planos Diretores Municipais e os Planos de Recursos Hídricos, os quais devem ser aplicados em nível de bacia hidrográfica. Esses instrumentos atuam no planejamento de ações para contenção de inundações e na gestão de recursos hídricos como um todo (FRAGOSO, 2013). O evento de 2010 foi de grande incentivo para que várias das medidas citadas fossem enfim desenvolvidas, principalmente no que diz respeito à prevenção. No entanto, a não conclusão dos projetos das barragens, por exemplo, possibilitou que outro evento extremo danoso atingisse a Zona da Mata Sul pernambucana em 2017. Nesta ocasião 68 cidades foram afetadas, 13 decretaram calamidade, incluindo Palmares e Barreiros, e 35 mil pessoas ficaram desabrigadas (PORTAL FOLHA PE, 2017).

### 2.3 CONCEITO, COMPONENTES E ANÁLISES DO RISCO

Desastres não são naturais. No dicionário, a palavra natural denota algo pertencente à natureza, gerado pela mesma, feito de forma espontânea, sem interferência humana (NATURAL, 2019). Adjetivar desastres como acontecimentos naturais é limitante e equivocado. A participação da natureza existe, mas não é única responsável pela concretização do desastre. Nessa mesma linha de raciocínio, outro erro comum é achar que desastres são acidentes, não são. O fator que lhe agrega aleatoriedade também não é determinante para sua ocorrência. Dessa forma, existem meios de prever possíveis cenários, diminuir riscos e mitigar danos. Tudo passa pela prevenção. E para prevenir é preciso primeiro conhecer.

O desenvolvimento contínuo do conhecimento imprime um caráter mutável à tarefa de conceituar (LAVELL et al., 2012). Disso deriva a não padronização normativa de definições científicas no que se refere a risco. Cada pesquisador é levado a desenvolver quadro conceitual próprio de modo a estruturar sua pesquisa e melhor comunicar seus resultados. Seguindo esse pensamento, os conceitos adotados no presente estudo seguirão as definições estabelecidas pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), um corpo científico patrocinado pelas Nações Unidas que revisa e analisa toda informação produzida referente a mudanças climáticas (Figura 6). Sendo assim, tem-se o risco como a probabilidade do desastre que é, por sua vez, definido pela interação entre três elementos principais: perigo, exposição e vulnerabilidade (LAVELL et al., 2012).

Figura 6: Organograma conceitual



Fonte:

Adaptado de LAVELL et al. (2012).

O perigo é classificado de acordo com o fenômeno natural, neste caso a inundação, sendo definido pelo potencial de perdas que pode gerar a pessoas, comunidades, infraestruturas, bens, serviços ou outros recursos (RANA & ROUSTRAY, 2018). Enquanto a exposição é classificada de acordo com a localização geográfica dos elementos passíveis de serem atingidos pelo fenômeno natural extremo, sendo resultado do ambiente em que se estabelecem e seus arredores (LAVELL, et al., 2012).

O terceiro componente do risco, a vulnerabilidade, é fator que não apresenta consenso na literatura. Seu caráter multidisciplinar e a complexa dinâmica entre seus constituintes contribuem para a dificuldade em sua definição (MAVHURA et al., 2017). A vulnerabilidade não está relacionada a fatores físicos e naturais, mas sim às características intrínsecas dos elementos expostos. No caso de cidades, a vulnerabilidade relaciona-se com aspectos como demografia, densidade populacional, uso do solo, além de outros itens como o potencial de perdas, capacidade de lidar com as consequências pós-evento, preparo e ações de prevenção (BALICA & WRIGHT, 2010; SOLÍN et al., 2018; BATISTA, 2015).

Enquanto a exposição mantém-se neutra diante da pluralidade social de uma comunidade, os impactos irão variar de acordo com as características de vulnerabilidade particulares de cada grupo componente dessa população. Por exemplo, supondo que numa mesma planície de inundação, com grau de exposição

semelhante, estejam situados dois municípios cuja renda média de seus habitantes varie drasticamente. Na ocasião de uma inundação, a população com maior renda terá melhores condições de responder aos efeitos do evento. Além da renda, tal análise pode ser realizada com outros aspectos como a existência de sistemas de alerta, experiência da população com eventos extremos, densidade populacional, infraestrutura urbana e tantos outros. Evidencia-se desse modo a importância da vulnerabilidade na composição e estudo do risco (HUMMELL et al., 2016).

Essa complexidade observada na vulnerabilidade se dá principalmente pelo caráter diverso de seus constituintes, dentre os quais se destaca a resiliência, constituída de um conjunto de propriedades não lineares inter-relacionadas dentro de sistemas sociais complexos e dinâmicos (SAJA et al., 2018; MARCHESE et al., 2018). O Escritório para Redução de Riscos de Desastres das Nações Unidas (UNISDR, 2009) estabelece uma determinação clara para resiliência:

“A habilidade de um sistema, comunidade ou sociedade exposta a riscos de resistir, absorver, acomodar e se recuperar dos efeitos de um perigo em tempo e de maneira eficiente, inclusive através da preservação e restauração de suas estruturas e funções básicas.”

Enquanto fator atuante antes, durante e após eventos desastrosos, a resiliência apresenta heterogeneidade de comportamentos, dinamicidade no tempo e contínua adaptação aos diferentes contextos. Disso surgem três possibilidades principais de entendimento desse indicador (TORABI et al., 2018; ABDULKAREEM & ELKADI, 2018):

- Resiliência da Engenharia é a capacidade de um sistema em suportar mudanças e manter as relações internas estáveis na ocorrência de um distúrbio. O sistema é, portanto, projetado para aquela situação e cessado o evento retorna ao estado inicial de equilíbrio.
- Resiliência Ecológica é fixada pela magnitude do distúrbio que pode ser absorvido antes que o sistema modifique sua estrutura. Não há apenas um estado de equilíbrio, podendo o sistema adotar modos alternativos de estabilidade cessado o distúrbio.

- Resiliência Evolucionária confronta a ideia de equilíbrio, considerando a mudança do sistema no tempo, com ou sem interferências externas. Os vários níveis de resposta de um sistema são considerados meios para possíveis trajetórias futuras. Este é um processo no caminho para adaptação e evolução dos sistemas, principalmente os sociais e ecológicos.

A adaptação, por sua vez, é compreendida como ajustes ocorridos em sistemas humanos ou naturais em resposta a estímulos climáticos atuais ou esperados, moderando danos ou explorando oportunidades (UNISDR, 2009). Esse conceito vem se popularizando entre gestores enquanto meio para redução da vulnerabilidade de populações em risco. A adaptação pode ser realizada em diferentes escalas sociais através de medidas que abrangem desde modificações em padrões de uso do solo e infraestruturas de proteção, até a alteração na percepção dos cidadãos comuns com relação ao risco.

Assim, além das políticas adotadas e obras realizadas no âmbito da gestão, a experiência com eventos extremos e impactos provocados pelos mesmos influencia diretamente o comportamento da população com relação ao risco e às medidas de adaptação passíveis de serem adotadas (BROWN et al., 2018). A compreensão dos componentes do risco é ponto de partida para entendimento e conseqüente desenvolvimento de uma gestão mais apta a planejar para a adaptação. As mudanças partem da educação e engajamento de todos os agentes com relação ao risco e suas dinâmicas (TORABI et al., 2018).

A Teoria Social do Risco busca ampliar esse campo de análise, somando outras dimensões que também contribuem para a complexidade desse problema, para a mitigação dos danos. Tais dimensões são igualmente importantes na compreensão do risco, sendo elas: a periculosidade, a vulnerabilidade, a exposição e a incerteza (BARRENECHEA et al., 2000). A periculosidade ligada aos aspectos físicos do fenômeno natural, a exposição representada na localização geográfica de bens e pessoas, a vulnerabilidade relacionada às características socioeconômicas dos grupos sociais envolvidos e a incerteza que pode estar presente em qualquer parte do processo ou em todo ele (FREIRE & NATENZON, 2013).

Sob a ótica da Sociologia, mais especificamente da teoria dos desastres, a complexidade das organizações sociais e o comportamento coletivo são definidos como pré-condição para que o evento natural extremo possa de fato se tornar um

fenômeno danoso. O desastre é interpretado como um tipo específico de problema social aflorado em um momento de crise, estando muito mais associado a processos socioambientais e de territorialidade do que ao fenômeno natural propriamente dito (VALENCIO, 2014; FREIRE & NATENZON, 2013).

O risco assim como o desastre seria então resultado das escolhas de uma sociedade quanto ao uso, ocupação e organização do espaço geográfico. A organização do poder público, a capacidade de resposta e as ferramentas de prevenção implantadas seriam fatores determinantes na origem dos danos. O risco existirá para todos, mas as respostas de cada grupo social frente a ele serão diferentes (VALENCIO, 2014; FREIRE & NATENZON, 2013).

No âmbito da engenharia, a diferença vai estar na nomenclatura e possivelmente nas aplicações, visto que as abordagens estarão mais voltadas para o desenvolvimento de tecnologias e da modelagem do fenômeno. Assim, a análise de indicadores e o mapeamento de risco de inundação podem ser realizados por abordagem qualitativa, quantitativa ou multicritério. Técnicas multicritério empregam diferentes indicadores para hierarquizar possíveis decisões a serem tomadas, de acordo com cada parte interessada, considerando problemas identificados e objetivos definidos previamente. Os métodos qualitativos baseiam-se no conhecimento de especialistas. E as metodologias quantitativas utilizam-se de modelos para quantificação de danos e riscos em termos monetários (ALBANO et al., 2017; BARQUET & CUMISKEY, 2018).

Na aplicação dos conceitos, Oubennaceur et al. (2019) abordam o risco como a combinação entre a probabilidade de uma inundação e as possíveis consequências de tal evento. O conceito de risco na prática é dividido pelos autores em perigo e vulnerabilidade. O perigo é descrito pelas características físicas das inundações como extensão e profundidade, juntamente a sua probabilidade de excedência ou tempo de retorno. Enquanto a vulnerabilidade é por sua vez constituída por dois elementos principais, exposição e suscetibilidade. A exposição define quem ou o que será afetado, enquanto a suscetibilidade classifica como os elementos afetados serão prejudicados. Tal conceituação é posta em prática através do desenvolvimento de uma abordagem probabilística para o mapeamento de risco.

Kheradmand et al. (2018) têm o risco enquanto a magnitude de um perigo em termos de sua intensidade e frequência. Desse modo, análises de risco de inundação seriam métodos para quantificação da frequência dos eventos e de seus

respectivos danos, através de recursos como mapeamentos de perigo, desenho de estruturas hidráulicas e planejamento de sistemas de drenagem, por exemplo. Como principais componentes dessas análises têm-se o perigo (profundidade, velocidade, frequência da inundação), a exposição (população e bens localizados em áreas propensas a inundação) e a vulnerabilidade (suscetibilidade dos elementos expostos). Com essa base teórica, uma análise probabilística de todos os possíveis cenários é adotada para avaliação de impactos na área de estudo e de proposta de adaptação frente a desastres.

Albano et al. (2017) exploram duas metodologias de mapeamento de risco de inundação, uma qualitativa, EDQ (Expert-Driven Qualitative Risk), e uma quantitativa, FloodRisk. Em ambas as abordagens o perigo é interpretado através dos tempos de retorno dos eventos, enquanto a exposição e vulnerabilidade são obtidas pela identificação e estimativa de valor dos elementos afetados. Dados censitários, espaciais e mapas de uso do solo são algumas das fontes de dados. Na metodologia qualitativa, a vulnerabilidade recebe valor constante devido à ausência de curvas cota-dano específicas do local em estudo. O risco é obtido pela combinação dos diferentes mapas através de uma matriz que o classifica em quatro possíveis categorias (risco baixo, moderado, alto e muito alto). Já na abordagem quantitativa, a vulnerabilidade é analisada através de algumas funções cota-danos existentes aplicadas ao local de estudo. Por fim são calculados o risco e o custo unitário do dano esperado (Euros/m<sup>2</sup>).

Em outro exemplo, Mili et al. (2018) desenvolveram um índice chamado Integrated Earthquake Safety Index (IESI), que combina perigo, vulnerabilidade e capacidade de resposta. O peso da contribuição de cada indicador para o risco final é obtido pelo julgamento de especialistas ou por método matemático. Este último, especificamente, o método AHP (Analytic Hierarchy Process), ou método de análise hierárquica, que decompõe e sintetiza as relações entre critérios até que ocorra a priorização dos indicadores envolvidos, possibilitando avaliação de desempenho.

Park & Won (2019) adotam o risco enquanto produto dos fatores perigo, exposição e vulnerabilidade. A vulnerabilidade é classificada por lógica difusa e mapeada de acordo com o uso do solo e das edificações. E o perigo, que também engloba a exposição, considera aspectos ambientais como planície de inundação, topografia, profundidade da água e precipitação. O zoneamento realizado busca identificar a distribuição das edificações e áreas urbanas com base em seu índice de

risco, servindo como balizador para futuras ações de planejamento urbano, o qual segundo os autores é de extrema importância para a redução de danos.

Santos et al. (2020) desenvolveram e aplicaram um índice de risco de inundação também composto pelos componentes perigo, exposição e vulnerabilidade. O perigo é entendido como a probabilidade de ocorrência de uma inundação em área e intervalo de recorrência determinados. A exposição é caracterizada pelas pessoas, propriedades e infraestruturas que estejam em áreas passíveis de serem atingidas por inundações. E a vulnerabilidade é a predisposição de tais elementos expostos a sofrerem impactos devido a um perigo. A composição em índice ajuda a espacializar o comportamento de cada componente, o que varia de acordo com as características de cada região em estudo. Essa compreensão é relevante para a promoção de uma gestão de riscos mais diversificada e adequada às necessidades locais.

A análise de risco fornece meios para organização do conhecimento disponível acerca de um sistema específico, com foco na compreensão de seu comportamento e nas possibilidades de falha, para que as decisões a serem tomadas levem à melhoria de desempenho e diminuição de riscos (ZIO, 2018). No contexto das inundações, os índices contribuem para a caracterização do nível de segurança de cada zona urbana e os mapas fornecem informações sobre a distribuição espacial dos perigos naturais (MILI et al., 2018; BATHRELLOS et al., 2017).

## 2.4 ELEMENTOS DO RISCO

Enquanto componentes do risco, perigos podem ser definidos como fenômenos potencialmente prejudiciais de diferentes origens. Quando de origem natural, sua fonte pode ser geológica, meteorológica, biológica, ou hidrológica como no caso das inundações. A descrição quantitativa desses eventos é feita através da modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Estas últimas proporcionam análises da frequência de ocorrência do fenômeno para diferentes intensidades e áreas, utilizando-se de dados históricos acerca de aspectos topográficos, meteorológicos e sobre estruturas construídas (UNISDR, 2009; QIANG, 2019).

Assim, entendendo o risco e conseqüentemente o desastre como produto de seus fatores, o estudo de indicadores é essencial em aplicações como a construção

de barragens, estudos de erosão, mapeamento de perigo e planejamento de recursos hídricos (TENG et al., 2017). Do ponto de vista da modelagem, tem-se enquanto indicadores a extensão da mancha de inundação, a profundidade, a velocidade da água e a duração do evento dentre outros, além de combinações como energia, fluxo de força e intensidade (KREIBICH et al., 2009):

$$Energia = h + \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

$$Fluxo\ de\ força = hv^2 \quad (2)$$

$$Intensidade = vh \quad (3)$$

Sendo “h” a profundidade da água (m), “v” a velocidade de fluxo (m/s) e “g” a aceleração da gravidade (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Na literatura, várias metodologias interpretam o perigo de inundação como elemento associado à probabilidade de ocorrência de um desastre com determinada intensidade, tempo e área. O perigo está, portanto, intimamente relacionado a um aspecto estatístico conhecido como tempo de retorno (Tr), o qual identifica o intervalo médio de recorrência de eventos de mesma intensidade. Usualmente, o tempo de retorno é inversamente proporcional à probabilidade de ocorrência dos eventos, de modo que uma chuva de 100 anos (Tr) possui probabilidade de ocorrência 1% em um ano qualquer, enquanto que uma chuva de 10 anos (Tr) possui 10% de probabilidade de ocorrência em um ano (ALBANO et al., 2017).

Cada tempo de retorno vai estar associado a um evento de chuva que conseqüentemente resultará em um hidrograma (gráfico vazão x tempo) e uma vazão de pico. O cálculo dessas chuvas pode ser realizado através de análises estatísticas de séries históricas ou de estimativas obtidas por modelagem hidrológica de chuvas de projeto ou hietogramas (gráfico precipitação x tempo), que são métodos simplificados de representação da distribuição temporal das precipitações. Por fim, são realizadas simulações hidrodinâmicas para obtenção das manchas de inundação e seus respectivos indicadores. Posteriormente a isso ainda é possível definir limiares através da normalização de valores e da definição das classes de

alto, médio e baixo perigo (ALBANO et al., 2017; DECINA & BRANDÃO, 2016; BEMFICA et al., 2000).

Como exemplos, tem-se Vu & Ranzi (2017) que através de modelagem obtêm valores de profundidade da água, velocidade de fluxo, duração e manchas de inundação para eventos com diferentes tempos de retorno (200, 100, 50, 20 e 10 anos). Os autores classificam o perigo por sua probabilidade e posteriormente, através de sua combinação aos danos potenciais, realizam o que chamam de análise de risco.

Oubennaceur et al. (2019) desenvolvem seus mapas de perigo através tanto de um modelo 2D, quanto da discretização da bacia e uso do Método de Monte Carlo. Este último, uma técnica com princípio na variabilidade dos parâmetros da modelagem hidrológica, apresentando-se como uma alternativa mais simples e rápida à modelagem 2D tradicional. Já Kheradmand et al. (2018), seguem os mesmos princípios associando os mapas de perigo a cada tempo de retorno definido, mas usando o modelo HEC-RAS e com foco nas profundidades e manchas de inundação.

Uma abordagem um pouco diferente é encontrada em Shrestha & Lohpaisankirt (2017) cuja pesquisa está mais voltada para previsão de cenários futuros e avaliação da influência das mudanças climáticas em eventos de inundação. O perigo aqui é dividido em categorias correspondentes a profundidades críticas de inundação pré-definidas. Os autores se limitam a simulações hidráulicas 1-D com o modelo HEC-RAS. E os hidrogramas sintéticos obtidos correspondem a três tempos de retorno de modo que se possam avaliar cenários futuros.

Ainda sobre os elementos do risco tem-se exposição e vulnerabilidade. Exposto está tudo aquilo que pode sofrer perdas na ocorrência de uma inundação devido a sua localização geográfica, sejam pessoas, edificações, infraestruturas, bens ou até sistemas inteiros. Além da identificação desses elementos, a exposição também é caracterizada pelo quantitativo como, por exemplo, o número das pessoas que vivem ou trabalham em áreas de perigo. Para tanto, são usados dados espaciais, censitários, mapas de uso do solo e imagens de satélite. O nível de exposição vai, por sua vez, variar de acordo com fatores ambientais como topografia e precipitação (UNISDR, 2009; ALBANO et al., 2017; PARK & WON, 2019).

A vulnerabilidade por sua vez está em fatores sociais que caracterizam os elementos expostos. Sua representação espacial esclarece questões referentes aos

desafios socioeconômicos e ambientais a serem enfrentados pelas diferentes comunidades. Tarefa difícil e realizada de modo mais lento em regiões mais pobres. O estudo da vulnerabilidade investiga, no caso de agrupamentos humanos, os indivíduos através de dados demográficos como renda, acesso à saúde, tipo de moradia, trabalho, dentre outros (MAVHURA et al., 2017).

Enquanto contribuição da natureza a desastres, perigos não podem ser completamente controlados. Sociedades podem, no entanto, reduzir o risco associado a tais cenários ao mudarem o paradigma do perigo para o da vulnerabilidade. A escolha da escala assim como dos indicadores a serem utilizados é passo importante em estudos desenvolvidos nesta temática (MAVHURA et al., 2017).

Avaliações quantitativas, qualitativas, abordagens determinísticas, ou paramétricas, a falta de um procedimento padrão associada à escassez de dados em locais menos desenvolvidos torna avaliar a vulnerabilidade uma tarefa complicada. O resultado é a fragmentação de conceitos e metodologias que tentam abarcar sua natureza multidisciplinar. Onde há deficiência ou não disponibilidade de dados, acaba existindo uma restrição nas abordagens metodológicas e na variedade de indicadores que podem ser usados na condução dessas análises (OGIE et al., 2018).

Diante dessa problemática, índices e indicadores têm sido ferramentas metodológicas usuais na busca por simplificações que viabilizem uma representação válida da vulnerabilidade (BATISTA, 2015). E é assim que aparecem as análises de dano, identificando o grau do dano potencial originado na ocasião de um evento extremo (BATISTA, 2015; MERZ, 2007).

A estimativa de danos diretos, a ser detalhada mais a frente, é tarefa de extrema relevância e difícil execução. Para tanto, faz-se uso das funções cota-dano que são determinadas pela relação entre as características da inundação e a extensão dos prejuízos econ micos. Estimativas atualizadas e precisas do potencial de perdas originadas de desastres contribuem significativamente para a compreensão do risco, implementa o de medidas de mitiga o e planejamento emergencial pós-desastre, ou seja, para o desenvolvimento sustentável de uma região (MCGRATH et al., 2015).

## 2.5 MODELAGEM E MODELOS

Estudos hidrológicos e hidráulicos são imprescindíveis para esta temática. É através da modelagem que se pode simular eventos extremos, avaliando comportamentos e consequências. Projeto de estruturas hidráulicas, monitoramento de recursos hídricos, sistemas de previsão e alerta são algumas das aplicações nas quais se faz uso da modelagem. Os modelos podem ser definidos enquanto formulações matemáticas que buscam representar um sistema e, para tanto, fazem uso de certas simplificações. Neste caso, os modelos matemáticos irão simplificar a natureza e descrever os processos hidrológicos por meio de equações. O uso do modelo será definido pelo termo simulação (LIMA NETO, 2019; SANTOS, 2013).

A simulação, por sua vez, é constituída em três etapas: estimativa, verificação e previsão. A estimativa, também denominada ajuste, ou calibração, é caracterizada pela definição dos parâmetros. A verificação é a simulação com parâmetros estimados para análise da validade do modelo. E a previsão é a simulação com parâmetros ajustados para obtenção de resultados a partir de diferentes entradas. Os modelos ainda podem ser diferenciados em diversas outras categorias. (LIMA NETO, 2019; SANTOS, 2013).

Modelos contínuos são aqueles que simulam longos períodos de tempo, abrangendo vários eventos de precipitação e o intervalo entre eles. Modelos em eventos simulam apenas um evento de precipitação, a qual pode durar de poucas horas a alguns dias. Modelos distribuídos subdividem a bacia e discretizam os parâmetros no espaço. Modelos concentrados usam características médias para toda a bacia. Modelos conceituais ou físicos associam-se aos processos por meio de equações. Modelos empíricos baseiam-se em dados observados. Modelos determinísticos são aqueles em que todos os parâmetros são conhecidos e não aleatórios. Modelos estocásticos são os que têm aleatoriedade associada a seus parâmetros. E ainda podem-se destacar os modelos cujos parâmetros são medidos e aqueles cujos parâmetros são ajustados (LIMA NETO, 2019; BATISTA, 2015).

No contexto ambiental de desastres associados a inundações, tem-se como base a bacia hidrográfica, que pode ser caracterizada por modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Os modelos hidrológicos são uma representação sintética do ciclo hidrológico, simulando a transformação da precipitação em vazão e integrando as diferentes fases que contribuem para tal processo. Enquanto os modelos

hidrodinâmicos caracterizam o comportamento da propagação da água (vazão) em canais artificiais ou naturais (LIMA NETO, 2019; BATISTA, 2015).

O avanço tecnológico e o desenvolvimento de novas ferramentas computacionais expandiram as possibilidades referentes à modelagem. Modelos matemáticos complexos começaram a ser introduzidos através de códigos em ambientes computacionais, e passaram a ser resolvidos através de algoritmos apropriados (FELDMAN, 2000). Essa é uma tendência que se mantém, uma vez que os problemas vão se modificando e requisitando soluções cada vez mais sofisticadas. Tal cenário impulsiona o desenvolvimento das ferramentas computacionais e de suas possibilidades.

Diversos são os modelos disponíveis atualmente para uso nos mais variados estudos e nas mais diversas condições. Li et al. (2019) propõem um modelo acoplado chamado TPMF proveniente dos modelos TOPMODEL e MIKEFLOOD, em estudo aplicado na China. TOPMODEL é um modelo topo hidrológico semidistribuído, no qual a topografia e o solo são tidos como fatores críticos na simulação do escoamento superficial. Já o MIKEFLOOD é um modelo hidrodinâmico que simula fluxo 1D para canais e 2D para planícies de inundação. Neste trabalho específico, utilizou-se um modelo acoplado 1D-2D para simulação dos eventos de cheia. O desempenho do TOPMODEL foi satisfatório para modelagem baseada em eventos, destacando o melhor resultado para eventos com picos únicos de cheia e com períodos de retorno mais altos. A combinação entre os dois modelos demonstrou coerência entre os padrões espaciais medidos e simulados, confirmando sua adequação para aplicações práticas.

Outro software é o europeu LISFLOOD, um modelo hidrológico físico e distribuído criado por um grupo do Joint Research Centre (JRC) da Comissão Europeia para previsão de inundações e para análise das mudanças climáticas em bacias transnacionais. Gai et al. (2019) aplicaram tal modelo em estudo desenvolvido na China. Períodos de retorno foram calculados para toda a série de vazões através da distribuição de Gumbel. Além disso, nove cenários foram criados para análise de intervenções (criação de reservatórios, diferentes usos do solo, desvio de rios tributários) e respectivos possíveis impactos às inundações locais. O desempenho do modelo foi melhor nas simulações com dados mensais e nos anos chuvosos. Os autores destacam o LISFLOOD como um modelo hidrológico apropriado ao planejamento da gestão de recursos hídricos, na escala da bacia.

Mesmo não utilizado por Gai et al. (2019), deve-se mencionar também o software LISFLOOD-FP que é um modelo hidrodinâmico bidimensional desenvolvido pela Universidade de Bristol (Reino Unido) para simulação de manchas de inundação em topografia complexa.

No contexto desta pesquisa, destacam-se os modelos HEC, mais especificamente o HEC-HMS e o HEC-RAS. Desenvolvidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército Estadunidense (U.S. Army Corps of Engineers - USACE), os modelos HEC são gratuitos, possuem ampla aplicabilidade, atualizações constantes e suporte técnico, o que justifica sua popularidade.

O HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) foi projetado para simulação dos processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas. A precipitação, dado de entrada normalmente usado, é transformada em vazão, através de modelos matemáticos que simplificam e caracterizam o ciclo hidrológico. A precipitação pode ser obtida através de registros históricos (dados observados), úteis para calibração e validação de parâmetros do modelo. Ou pode-se simular uma chuva de projeto sintética, úteis para análise de eventos atípicos e para descrição do risco de inundação (FELDMAN, 2000).

O software HEC-HMS representa a bacia graficamente por elementos como subbacias, trechos, junções, reservatórios, desvios e exutórios. Em sua mais nova versão (4.3), todos os modelos matemáticos são determinísticos, com alguns de seus principais modelos quase-acoplados. Ou seja, não há aleatoriedade nos parâmetros e o programa simula as etapas do ciclo hidrológico em uma sequência pré-estabelecida. Uma simplificação da realidade, uma vez que na natureza os processos estão ocorrendo de forma simultânea (SCHARFFENBERG et al., 2018).

Os hidrogramas — gráficos de representação da variação da vazão no tempo — obtidos por este software podem ser utilizados de modo direto ou em conjunto com outros softwares. Tais aplicações abrangem estudos de disponibilidade de água, drenagem urbana, sistemas de previsão, análise de impactos de urbanização, redução de danos de inundação, dentre outros (SCHARFFENBERG et al., 2018).

Prática comum é utilizar os hidrogramas de saída do HEC-HMS como dados de entrada do HEC-RAS (River Analysis System). Este último é um pacote integrado de programas projetado para realizar cálculos hidráulicos para toda uma rede de canais naturais ou superficiais. Esse software é capaz de simular escoamento

unidimensional permanente, escoamento unidimensional e bidimensional não permanente, transporte de sedimentos e qualidade da água. Todo o processo é facilitado através de uma interface gráfica do usuário (GUI), além de recursos para armazenamento e gerenciamento de dados (BRUNNER, 2016).

Quanto ao escoamento, é possível classificá-lo de acordo com diferentes regimes. No fluxo permanente a variação de parâmetros hidráulicos, como velocidade e profundidade da água, com relação ao tempo é nula. Já no regime não-permanente, o comportamento é o contrário, com variação dos parâmetros no tempo e no espaço. O escoamento permanente ainda pode ser uniforme ou variado. No regime uniforme o vetor velocidade se mantém constante em módulo, direção e sentido devido a não variação do perfil geométrico do canal, enquanto no fluxo variado essa constância não existe (BAPTISTA et al., 2011).

Exemplo de aplicações desses softwares foi realizado na Índia por Devi et al. (2019). O trabalho faz projeções de cenários futuros levando em consideração a rápida urbanização da bacia em questão e a intensificação do regime de chuvas devido às mudanças climáticas. Além dos modelos citados anteriormente, a pesquisa projetou tendências urbanas através de uma Rede Neural Artificial, realizou classificação do uso e cobertura do solo por imagens (Landsat e Google Earth), validou a modelagem com coeficientes estatísticos ( $R^2$ , Nash-Sutcliffe), produziu mapeamento de um evento de cheia específico, e determinou seis zonas de perigo com base em profundidade da água.

O uso de modelos também atua como suporte a gestão, com o mapeamento de áreas de inundação, mesmo diante da deficiência de dados, como ocorre no estudo de Nharo et al. (2019). Os modelos americanos foram utilizados para análise da variação espacial e temporal de cheias no Zimbábue, mais especificamente em uma região em que eventos extremos já mataram centenas de pessoas e desalojaram outras milhões. Nesse estudo, o HEC-HMS e o HEC-RAS são escolhidos por sua flexibilidade computacional. Os dados utilizados são diários, a calibração é realizada manualmente, e os coeficientes de sensibilidade adotados são Nash-Sutcliffe e RBIAS. Os modelos conseguem reproduzir de modo aceitável a resposta da bacia, mas às vezes subestimando, e outras superestimando as vazões simuladas.

Ribeiro Neto et al. (2015) desenvolvem outro trabalho que faz uso dos modelos HEC, dessa vez no Brasil, na bacia do rio Una. Ênfase é dada a sua vasta

aplicação, nos mais variados problemas das mais diferentes bacias. Outro aspecto positivo é sua fácil conectividade com Sistemas de Informações Geográficas, tanto para pré quanto pós-processamento. O modelo chuva-vazão é calibrado e verificado com simulações contínuas e dados diários, enquanto o modelo hidrodinâmico é calibrado e verificado para eventos de cheia. O HEC-RAS apresenta instabilidade numérica para eventos de baixa vazão que ocorrem em simulações contínuas. A calibração é manual e os coeficientes estatísticos aplicados incluíram Nash-Sutcliffe, erro de volume e erro percentual da vazão de pico (EQP). A vazão calculada por fim foi coerente com os picos de vazão medidos e a parametrização do modelo foi bem representativa da bacia em estudo. Mesmo havendo superestimação da profundidade da água, a planície de inundação simulada foi bem definida.

## 2.6 ANÁLISE DE DANOS

Danos podem ser classificados em tangíveis, quando é possível associar valor monetário (p.ex., perdas materiais), e intangíveis, quando tal associação não existe ou não é simples (p.ex., perda de vidas humanas, problemas de saúde). Os danos também podem ser diretos, quando resultam do contato com a água (p.ex., deterioração física de bens, estruturas, instalações e propriedades) e indiretos, na ausência do contato (p.ex., interrupção de negócios, trânsito e serviços) (GARROTE et al, 2016; MACHADO et al., 2005).

Na literatura científica, os danos diretos tangíveis são os mais comumente retratados por sua maior acessibilidade, dentro de um contexto que normalmente tem de enfrentar a escassez, a variabilidade e as incertezas ligadas à modelagem (ELMER et al., 2010). Sendo as curvas cota-dano ou profundidade-dano, o método internacionalmente mais reconhecido e aplicado para análises e estimativas nesse quesito. Tais curvas podem ser derivadas de modelos empíricos ou sintéticos (McGRATH et al., 2018).

Modelos empíricos, ou históricos, estruturam-se com base em dados observados, coletados após eventos extremos relevantes. E os modelos sintéticos utilizam abordagem conceitual e conhecimento de especialistas para a definição de possíveis danos, possibilitando o cálculo de cenários variados (McGRATH et al., 2018; NAGEM, 2008). Também se deve observar que de acordo com o objetivo da estimativa de perdas, o custo pode ser interpretado como valor de reposição, preço

para compra de um novo objeto, ou valor depreciado, preço do objeto na ocasião do dano (CAMMERER et al., 2013).

Para a construção das curvas, os indicadores de perigo, ou parâmetros de impacto, como profundidade da água, velocidade de fluxo e combinações de ambos (energia, intensidade e fluxo de força), podem ser diretamente correlacionados aos danos. No entanto, sua influência varia de acordo com o tipo de dano que se busca analisar. Como é possível visualizar na Tabela 1, velocidade de fluxo, força e intensidade possuem maior influência no que concerne a danos infraestruturais em rodovias, enquanto para edifícios residenciais, os indicadores mais influentes são profundidade da água e energia (KREIBICH et al., 2009).

Tabela 1: Grau de influência dos indicadores de perigo em diferentes danos

| Parâmetros de impacto | Tipos de danos                             |                                                |                                             |                                                 |                                   |
|-----------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
|                       | Danos estruturais a edifícios residenciais | Danos estruturais a infraestrutura de rodovias | Perdas monetárias em edifícios residenciais | Perdas monetárias em infraestrutura de rodovias | Interrupção de negócios e duração |
| Velocidade do fluxo   | Nenhuma                                    | Forte                                          | Fraca                                       | Nenhuma                                         | Nenhuma                           |
| Profundidade da água  | Forte                                      | Média                                          | Média                                       | Nenhuma                                         | Média                             |
| Energia               | Forte                                      | Média                                          | Média                                       | Nenhuma                                         | Fraca                             |
| Força de fluxo        | Fraca                                      | Forte                                          | Fraca                                       | Nenhuma                                         | Nenhuma                           |
| Intensidade           | Fraca                                      | Forte                                          | Fraca                                       | Nenhuma                                         | Fraca                             |

Fonte: Adaptado de KREIBICH et al. (2009).

### 2.6.1 Panorama mundial

Referência mundial na questão de impactos de inundações, Penning-Rowell & Chatterton (1977) produziram o mais abrangente material técnico sobre o tema. Neste primeiro livro, conhecido como “Blue Manual”, os autores definem duas classes de danos possíveis, estruturais (aspectos físicos construtivos) e inventário

(bens pessoais). A estimativa do potencial de danos é então relacionada aos efeitos da inundação (profundidade e duração) em cada componente da residência (estrutura e inventário). Assim, para quesitos estruturais desenvolve-se uma matriz profundidade/duração/dano, para 21 tipos de residências, 5 profundidades significativas e 2 durações de inundação. E para o inventário, tem-se uma matriz para 84 tipos residenciais, 15 profundidades e 2 durações. Ajustes são realizados e a combinação das matrizes produz outra matriz profundidade/dano residencial final completa. Além do azul, outros trabalhos realizados para o Reino Unido foram somados ao que hoje se conhece como “Multi-Coloured Manual”, um grande acervo de conhecimento acerca dos danos de inundações e dos benefícios associados à gestão de risco.

Baró-Suárez et al. (2007), no México, propõem metodologia para construção de curvas de danos econômicos potenciais tangíveis por inundação em zonas habitacionais e agrícolas. Nas zonas residenciais, além das características socioeconômicas da população, também foi levantado o valor unitário das construções e a altura da lâmina d'água da inundação. As casas foram divididas em classes de acordo com as características socioeconômicas e o prospecto dos danos para os diferentes intervalos de altura da lâmina d'água foi obtido através de consulta a especialistas. Dados referentes a danos e cotas foram confrontados em gráfico e um modelo matemático do tipo regressivo foi construído. Os danos totais para cada uma das classes de casas, assim como seus respectivos modelos de estimativa, foram por fim transformados em número de salários-mínimos de modo a permanecerem atualizados ao longo dos anos.

Kang et al. (2005) estruturaram um framework com funções de perda para estimativa regional de danos em áreas residenciais de Taiwan. No que concerne aos elementos expostos, foi utilizada uma base de dados do governo local que soma 300 mil registros de edificações separadas em cinco tipologias diferentes, além de mapas de uso do solo e dados censitários. Para cada tipo construtivo, foi estabelecido pelos autores um modelo padrão com características socioeconômicas como área construída, quantitativo de pessoas por casa, mobiliário e bens pessoais. Já as informações acerca dos danos em diferentes profundidades de inundação foram obtidas através de entrevistas com especialistas e pesquisa de mercado. Com a organização de um banco de dados georreferenciado foi possível então uma análise espacializada do dano regional.

Win et al. (2018) estabeleceram modelos cota-dano em bacia hidrográfica de Mianmar. Para caracterização dos eventos de inundação, foram utilizados mapas de inundação existentes e para a análise de danos foram aplicados questionários. Estes últimos construídos com base em informações referentes a inundações, demografia e danos (considerando danos a residências, bens pessoais e economia/renda). Escolhidas aleatoriamente, as casas foram categorizadas em três grupos com base em seu material construtivo (alvenaria, madeira, bambu), em sua estrutura (um pavimento, dois pavimentos, palafita) e na distância em relação ao rio (raio de 50 m). Dois níveis econômicos (alto e baixo) foram estabelecidos com base no número de membros da família residente e na dimensão das despesas diárias. A taxa de dano de cada residência é interpretada como a razão entre o valor das perdas e o valor total do domicílio. Um modelo de regressão múltipla foi usado para analisar a relação do dano em oposição aos possíveis fatores agravantes como profundidade da água, duração do evento, idade da construção, dentre outros. A taxa de danos à inundação acaba sendo representada pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} HDR = 1.930FH - 0.320FHG + 0.0x_1 + 0.887x_2 \\ + 0.965x_3 + 0.0y_1 + 0.264y_2 - 5.565 \end{aligned} \quad (4)$$

Sendo “HDR” a taxa de dano da casa, “FH” a altura da inundação acima do solo (m), “FHG” altura do piso acima do solo (m); “x<sub>1</sub>” representa casas de alvenaria, “x<sub>2</sub>” casas de madeira, “x<sub>3</sub>” casas de bambu, “y<sub>1</sub>” ausência de deslizamentos devido à erosão, “y<sub>2</sub>” ocorrência de deslizamentos por erosão.

Oubennaceur et al. (2019) calcularam os Danos Anuais Esperados (do inglês, EAD) para uma série de eventos, correlacionando os mesmos a sua respectiva probabilidade de excedência (tempo de retorno). São adotadas quatro curvas profundidade-dano baseadas em dados observados pós-evento e em características residenciais locais (número de pavimentos e presença/ausência de porão). As combinações entre as curvas e as profundidades de inundação em cada casa terminam por determinar taxas de dano (função relativa) para cada cenário. Tais taxas ao serem multiplicadas pelo valor das edificações resultam no dano absoluto. A estimativa de danos para cada residência é obtida pela seguinte relação:

$$Txe = f(h) \quad (5)$$

Sendo “Txe” a taxa de dano da casa (de zero a um) e “h” a profundidade da água em metros a partir do primeiro pavimento.

Albano et al. (2017) em estudo na Itália, aplicaram duas abordagens ao mapeamento de risco, uma qualitativa e outra quantitativa. Na abordagem qualitativa EDQ (do inglês, Expert-Drive Qualitative), o perigo está ligado principalmente ao tempo de retorno dos eventos. A exposição é adquirida através de dados censitários, mapas de uso do solo e informações referentes a estruturas e infraestruturas passíveis de serem afetadas por inundações. E a vulnerabilidade recebe valor constante, devido à ausência de curvas cota-dano específicas ao perfil da área de estudo. Uma matriz define risco em quatro possíveis categorias. Já na abordagem quantitativa, FloodRisk, oito curvas Frequência-Dano (F-D) existentes são aplicadas e o conceito de Danos Anuais Esperados (EAD) é explorado. O dano direto resultante é primeiramente expresso em euros e depois normalizado como dano unitário (Euro/m<sup>2</sup>), sendo calculado juntamente com o risco através da seguinte equação:

$$R_{Ni} = \frac{\sum_{j=1}^n D_{ij} \cdot P_{ij}}{\sum_{j=1}^n P_{ij}} \quad (6)$$

Sendo “i” os elementos expostos, “j” a probabilidade de excedência atribuída, “Dj” danos esperados por metro quadrado, “Pj” probabilidades de excedência, e “R<sub>Ni</sub>” dano unitário esperado por metro quadrado para cada elemento afetado.

No que concerne a softwares de estimativa de perdas, alguns se destacam. Nos Estados Unidos, desde os anos 1990, versões do modelo HAZUS vêm sendo atualizadas para quantificação de impactos humanos, financeiros e sociais provenientes de perigos naturais (terremotos, ventanias e inundações). Desenvolvido pela Agência Federal de Gestão de Emergência (FEMA, Federal Emergency Management Agency), o HAZUS é um sistema que possui módulos para inventário e classificação dos elementos em risco, sendo capaz de testar cenários

determinísticos e probabilísticos. Para inundações, a estimativa de perdas é realizada com base no valor depreciado dos itens expostos. E para danos especificamente referentes a construções, os dados de entrada requisitados são tipo de ocupação do edifício, elevação do primeiro pavimento e profundidade de inundação no edifício ou na área em que o mesmo se localiza. A estimativa é então realizada a partir da profundidade da água e através da aplicação de curvas cota-dano. Fora do território estadunidense, o HAZUS pode ter difícil aplicação pelas diversas necessidades de adaptação, principalmente no que concerne à exigência de extensa base de dados acerca dos elementos em risco (SCAWTHORN et al., 2006a; SCAWTHORN et al., 2006b; WIN et al., 2018).

Outro produto, do Centro de Engenharia Hidrológica (HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército Estadunidense (U.S. Army Corps of Engineers - USACE), o HEC-FDA é um programa interdisciplinar para formulação e avaliação de planos de redução de danos de inundação. O software permite integração entre análises hidrológica e econômica. Seu uso pode ser feito por todo o processo de planejamento, desde a fase pré-projeto, até alternativas pós-vida útil, com comparação de desempenho de diferentes planos. Tais planos podem ser diques, reservatórios, canais, medidas não estruturais, outras medidas ou combinações das mesmas. As análises são feitas através da combinação de dados hidrológicos e curvas cota-dano, as quais podem ser inseridas manualmente ou criadas automaticamente pelo modelo (CEIWR-HEC, 2016).

### **2.6.2 Panorama nacional**

No Brasil, registros referentes a desastres eram feitos oficialmente pelo Relatório de Danos, até meados dos anos 1990. De 1991 a 2010, dois outros documentos podiam ser usados para emissão de informações oficiais sobre eventos desastrosos, o Formulário de Notificação Preliminar de Desastre (NOPRED) e o Formulário de Avaliação de Danos (AVADAN). Tais documentos seguiam para a Coordenadoria Estadual da Defesa Civil e para a Secretaria Nacional de Defesa Civil, juntamente a um Decreto Municipal para oficialização da ocorrência do desastre. Posteriormente, em âmbito nacional o órgão responsável tornaria pública e reconhecida a situação de emergência ou estado de calamidade pública. A homologação final se dava pela Secretaria Nacional de Defesa Civil ou pelo

Ministério da Integração Nacional, e os documentos eram armazenados em meio físico, e algumas vezes digital, nas Coordenadorias Estaduais de Defesa Civil. Apesar desse sistema, o país ainda não conta com base de dados precisa, integrada e sistemática referente a desastres (UFSC, 2012). Assim, ao longo dos anos, metodologias para análise de danos em cenário nacional foram desenvolvidas, como se pode observar a seguir.

Machado et al. (2005) desenvolveram curvas dano x profundidade de submersão (DPS) empíricas. O estudo foi realizado para setor habitacional da cidade de Itajubá, Minas Gerais, utilizando como referência inundação ocorrida em janeiro de 2000. Além da parcela empírica da metodologia com aplicação de questionários, a pesquisa busca por generalizações que possam permitir o uso de tais curvas em outras regiões. Os danos às residências são associados a alguns fatores como área construída, qualidade da construção, estado de conservação, conteúdo, dentre outros. E esses fatores, por sua vez estão relacionados ao poder aquisitivo dos moradores. Padrões construtivos e classes socioeconômicas são estabelecidos fundamentados na norma NBR 12721:2005 e no Critério Brasil (ABIPEME, 2003), sistema de pontos para categorização econômica com base em bens pessoais e no nível educacional do responsável pela residência. As curvas DPS são construídas tendo como unidade o R\$ por m<sup>2</sup> construído. As equações para as classes A e B, C e D, respectivamente, são as seguintes:

$$D = 130,9 + 56,3 \ln(d) \quad (7)$$

$$D = 68,6 + 21,6 \ln(d) \quad (8)$$

Sendo “D” o dano estimado por unidade de área (R\$/m<sup>2</sup>) e “d” a profundidade da inundação (m).

Salgado (1995) estabelece modelo para avaliação econômica de projetos de drenagem e controle de inundações em bacias urbanas, construindo funções de prejuízo no Estado do Rio de Janeiro. Manchas de inundação para diferentes eventos foram simuladas. A caracterização e quantificação dos danos que seria feita por pesquisa de campo, em entrevistas com moradores cujas residências tivessem sido atingidas, devido à falta de recursos, foi substituída pela utilização de projetos representativos dos tipos de construções existentes na área inundável e pela análise

de especialistas. O modelo considera que o valor da edificação é seu custo de reposição corrigido por um fator de depreciação física. E o custo de reposição é determinado pelo custo unitário de construção em função de fatores como área construída, número de pavimentos, qualidade da construção e estado de conservação. As funções inundação-prejuízo referentes às residências são então determinadas através de programa computacional, calculando os prejuízos em incrementos de 0,25 m de altura de inundação. Um método para quantificação dos prejuízos ao conteúdo das residências também é criado. O valor da edificação é calculado da seguinte maneira:

$$VUE_1 = CRE * DEP \quad (9)$$

$$CRE = b_1 * AC^{c_1} \quad (10)$$

Sendo “VUE<sub>1</sub>” o valor da edificação do imóvel, “CRE” o custo da reposição da edificação, “DEP” um fator de depreciação física, “AC” a área construída em m<sup>2</sup>, “b<sub>1</sub>” e “c<sub>1</sub>” são constantes que dependem do padrão de acabamento da construção.

Nagem (2008) propõe simplificação de ferramentas com metodologia aplicada no Rio de Janeiro, mas com intenção de poder ser replicada em outras áreas. Além de prejuízos referentes à propriedade (conteúdo e edificação), também são explorados custos relacionados a doenças de veiculação hídrica, limpeza, problemas no sistema de transporte e danos materiais a veículos. No que concerne aos prejuízos à edificação, a análise desenvolvida simula manchas de inundação, adota a profundidade de submersão como indicador principal e atualiza a proposta de SALGADO (1995). Por ser sintética, essa análise utiliza-se de imóveis-padrões, cujas características são definidas em norma (NBR 12721/2005) assim como seu custo unitário básico (CUB) de construção. Este último tem seu valor depreciado em 50%. A porcentagem de danos sofridos pelas edificações é relacionada a limiares de alturas de inundação. A fórmula proposta é por fim a seguinte:

$$CRE = 0,5 * CUB * PED * AIC \quad (11)$$

Sendo “CRE” o custo dos danos a edificação das residências, “CUB” o custo unitário básico de construção (R\$/m<sup>2</sup>), “PED” a porcentagem da edificação danificada e “AIC” a área inundada construída (m<sup>2</sup>).

Tachini (2010) busca desenvolver um método de avaliação quantitativo para danos referentes a inundações em áreas urbanas, em Blumenau, Santa Catarina. No que concerne a residências, foram aplicados questionários que identificaram itens como endereço do imóvel, posse, número de moradores, tempo de ocupação, renda familiar, nível de inundação ou submersão, idade do imóvel, área construída, acabamento, bens pessoais, enfermidades, estimativa de custos com limpeza, dentre outros. Paralelamente, manchas de inundação foram obtidas e combinadas a análises estatísticas de séries hidrológicas históricas para obtenção dos tempos de retorno dos eventos extremos em estudo. A altura de inundação (submersão) foi o indicador de destaque para avaliação dos danos às propriedades e os custos referentes a danos estruturais às residências foram calculados por metodologia adaptada de Salgado 1995 e Olivieri & Santoro, 2000. Com modificação nos limiares das alturas de submersão e no valor de depreciação dos imóveis, a equação referente aos danos a edificações residenciais ficou da seguinte maneira:

$$D_R = A_C * p * CUB * d * K_r \quad (12)$$

Sendo “D<sub>R</sub>” o dano residencial (R\$), “A<sub>C</sub>” a área construída (m<sup>2</sup>), “p” é a proporção de ocupação com edificação da área total inundada, “CUB” o custo unitário básico por unidade de área construída (R\$/m<sup>2</sup>), “d” é a depreciação do imóvel na área inundável (%) e “K<sub>r</sub>” coeficiente tabelado que leva em consideração os danos à edificação, conteúdo e a limpeza, relacionado ao nível de submersão.

Fadel et al. (2018a) utilizam metodologias de estimativa de danos por profundidade da água combinando um ponderador de frequência de recorrência de dano para obter o que os autores consideram como risco de prejuízo. Setores censitários são levantados para caracterização socioeconômica da área de estudo, no município de Lajeado, Rio Grande do Sul. É desenvolvida uma análise hidráulica, com uso do HEC-RAS para caracterização da planície de inundação e

probabilidades associadas, e uma análise econômica para estimativa dos prejuízos potenciais de cada mancha de inundação. Os danos por sua vez são estimados com base no custo unitário básico (CUB), nas áreas dos imóveis e em um Fator Multiplicador que permite extrapolar o prejuízo unitário calculado para uma residência padrão (B2). Os danos totais resultam de danos às edificações, ao conteúdo dos domicílios, referentes à limpeza e aos dias parados. A análise econômica de danos às edificações considera Tachini (2010) e conseqüentemente Salgado (1995).

Sousa & Goerl (2018) elaboraram metodologia para estimativa de danos utilizando dados cadastrais e profundidade da água. A altura de água é obtida através do modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage), e os dados cadastrais têm por base a Planta de Valores (NBR 14653-2). Esta última é a listagem dos valores genéricos de metro quadrado encontrada em legislação municipal de Timbó, Santa Catarina. A estimativa de danos, além dos dados do valor de terra, também se utiliza do CUB/m<sup>2</sup> (NBR 12721:2006) e de um Fator de Correção referente à situação de ocupação do lote (construído, construção em andamento, ruínas, demolição, não construído). A equação utilizada para cálculo do dano da área urbana do município foi a seguinte:

$$De = Hc * Valor \tag{13}$$

Sendo “De” o dano estimado, “Hc” a altura da água no pixel e “Valor” = valor do lote + (CUB\*Fator de Correção).

Jonov et al. (2013) obtiveram curvas de danos diretos de inundação em Belo Horizonte, Minas Gerais, através de levantamento realizado após inundações ocorridas em dezembro de 2008 e janeiro de 2009. São analisados os principais tipos de revestimentos dos componentes das edificações, seu comportamento perante as ações das águas de inundações (ações hidrostáticas, ações hidrodinâmicas, erosão, ação de flutuabilidade, ação de detritos, qualidade da água) e patologias desenvolvidas. Foram realizadas vistorias e aplicação de questionários, além de registro fotográfico. Para categorização das residências, devido a não obtenção de todas as plantas baixas, os dados foram sintetizados de acordo com

três tipologias pré-estabelecidas (Tabela 2). A pesquisa levantou orçamentos dos custos de recuperação das patologias, obtendo por fim curvas dos custos unitários versus profundidade de inundação para as residências de cada padrão construtivo.

Tabela 2: Tipologias adotadas para caracterização de residências (MG)

|          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo I   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- sala/quarto, banheiro, cozinha e área de serviço;</li> <li>- área total de 21,84m<sup>2</sup></li> <li>- piso cimentado liso;</li> <li>- pintura em tinta PVA;</li> <li>- esquadrias de aço (metalon)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                   |
| Tipo II  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- sala, 2 quartos, banheiro, cozinha e área de serviço;</li> <li>- área total de 49,38m<sup>2</sup></li> <li>- piso da sala em tacos de madeira;</li> <li>- piso cerâmico no banheiro e na cozinha;</li> <li>- paredes azulejadas no banheiro;</li> <li>- pintura em tinta PVA;</li> <li>- esquadrias de aço (metalon)</li> </ul>                                                                                    |
| Tipo III | <ul style="list-style-type: none"> <li>- sala, 3 quartos, sendo 1 suíte, 1 banheiro social, circulação, cozinha, área de serviço, banheiro de empregada e garagem;</li> <li>- área total de 106, 44m<sup>2</sup>;</li> <li>- piso da sala em tacos de madeira;</li> <li>- piso cerâmico no banheiro e na cozinha;</li> <li>-paredes azulejadas no banheiro e na cozinha;</li> <li>- pintura em tinta PVA;</li> <li>- esquadrias de aço (metalon)</li> </ul> |

Fonte: Adaptado de JONOV et al. (2013).

### 2.6.3 Curva probabilidade-dano

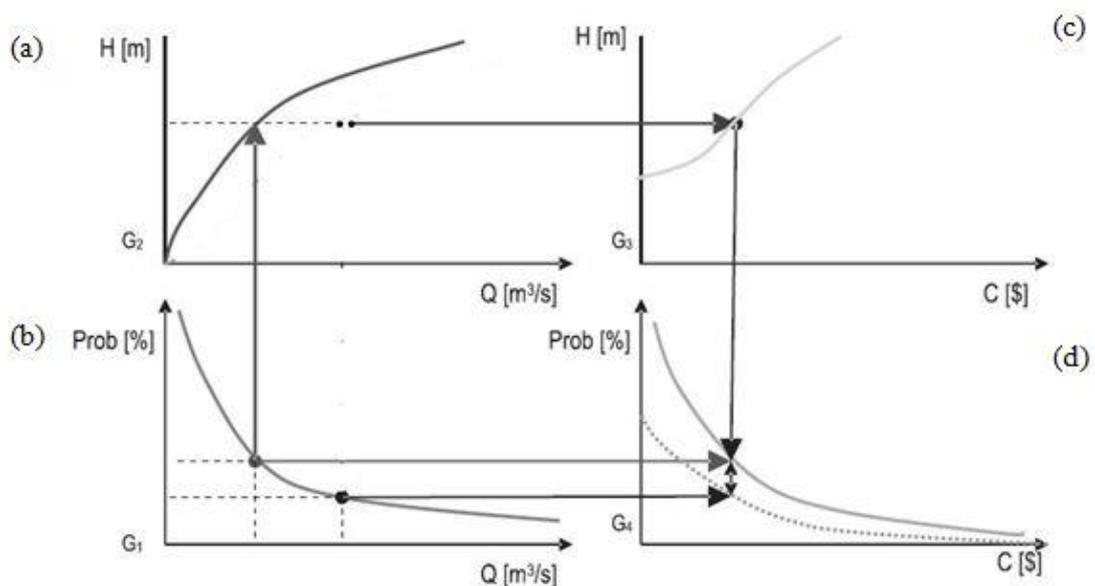
O benefício econômico ligado a cada medida de mitigação considerada está associado à diferença em danos econômicos nos cenários pré e pós-implantação. Essa visão é usualmente utilizada para avaliar o benefício de uma medida única (GARROTE et al., 2019; FADEL et al., 2018b). Já no âmbito da gestão de risco muitas vezes se faz necessário priorizar uma entre um conjunto de ações possíveis para o controle de inundações, buscando a opção mais efetiva em termos técnico e financeiro. Populares ferramentas na avaliação de cenários econômicos, as análises custo-benefício (CBA) são frequentemente utilizadas para comparar os benefícios de uma proposta com os custos de sua implantação, e para identificar quais as medidas

de redução de risco mais economicamente desejáveis (GARROTE et al., 2019; HAER et al., 2017).

O cálculo do benefício de uma medida de controle pode ser feito através de curvas dano versus profundidade de submersão (DPS). A Figura 7 ilustra a metodologia de cálculo. (a) relaciona valores de profundidade de inundação e vazão em uma dada seção do rio. A curva contínua caracteriza a relação profundidade-descarga atual, e a tracejada é a relação obtida após adoção da medida de controle em estudo. (b) mostra a relação vazão e probabilidade de excedência, decorrente da análise de frequência de eventos extremos. (c) apresenta uma curva DPS. E (d) mostra a probabilidade de excedência dos danos de inundação em termos monetários para a área em estudo (MACHADO et al., 2005).

A integral da função apresentada em (d), ou seja, a área sob a curva é a esperança matemática dos impactos anuais da inundação. A curva contínua demonstra a função dano-probabilidade de excedência para a situação sem medida de controle, enquanto a curva tracejada representa a situação com implantação de tal medida. A diferença entre as integrais das curvas caracteriza o benefício dessa implantação, em bases anuais. A integral da função da linha tracejada indica o custo resultante de inundações superiores à capacidade de controle da medida adotada (MACHADO et al., 2005).

Figura 7: Cálculo de benefícios de medidas de controle de inundação



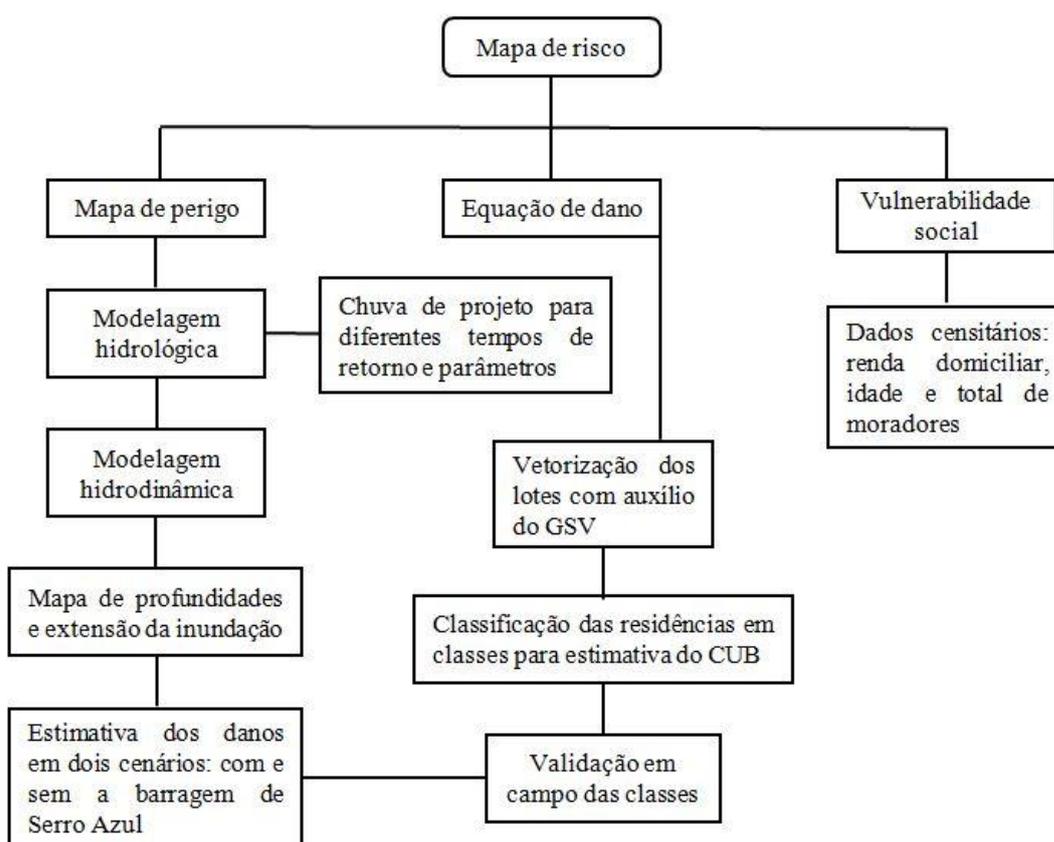
Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2005).

Como detalhado anteriormente, o risco é um tema complexo e abrangente, de difícil quantificação, que na engenharia sofre a influência de três fatores, perigo, exposição e vulnerabilidade. A relação entre a probabilidade de ocorrência de um evento e a magnitude de suas consequências pode ser sintetizada em uma curva probabilidade-dano, tida na engenharia como curva de risco. E o dano anual esperado, por sua vez, é estimado pela integral dessa curva (FADEL et al., 2018b).

### 3 METODOLOGIA

A síntese, elemento relevante no trabalho científico, está associada à localização, triagem, avaliação e combinação de informações. Pode-se alcançá-la normalmente por procedimentos transparentes, reproduzíveis e organizados de localização e resumo de tais informações (NAKAGAWA et al., 2019). Desse modo, o organograma da Figura 8 busca sintetizar a estrutura da metodologia desenvolvida.

Figura 8: Organograma da metodologia



Fonte: A autora (2021).

Um framework é definido como estrutura, um sistema de ideias ou regras usadas para planejar ou decidir algo. Uma estrutura básica que dá forma a algo (FRAMEWORK, 2019). Em tecnologia, abrange uma abordagem genérica com foco na resolução de problemas. Na ciência, pode ser um conjunto de informações que se relacionam na representação de um processo. Nesta pesquisa, o framework busca combinar métodos e dados que sejam acessíveis em uma estrutura de análise. Dessa forma, propõe-se uma maneira de concretizar análises de risco de

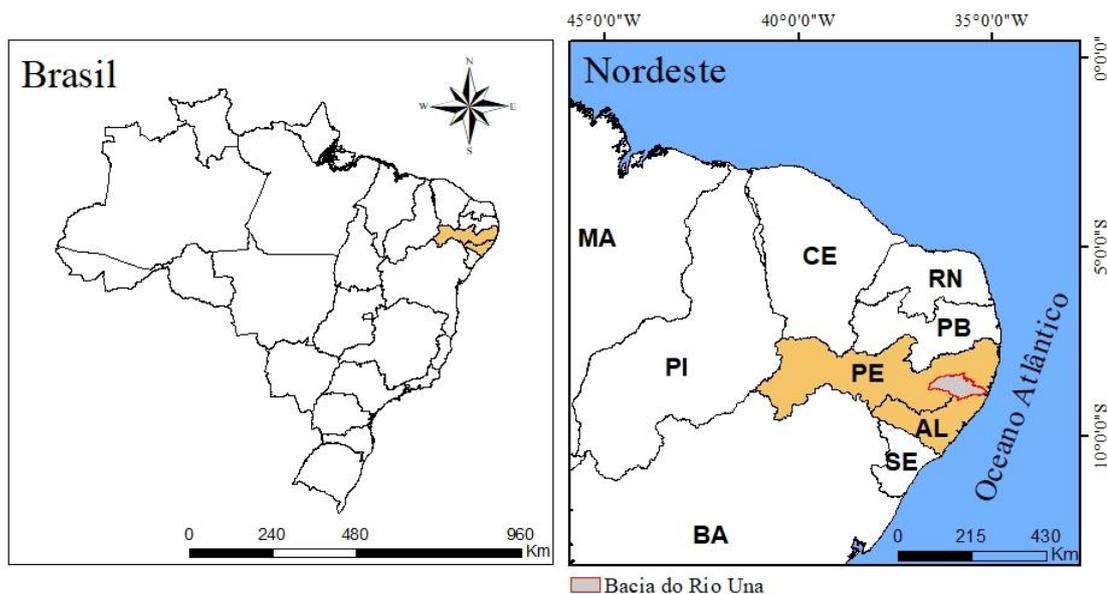
inundação que, mesmo sendo muito exploradas teoricamente, na prática do Brasil, terminam sem avançar por escassez de recursos.

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Una localiza-se entre as coordenadas 08°17'14"S, 08°55'28"S, 35°07'48"W, 36°42'10"W, nas mesorregiões do Agreste e Zona da Mata (Figura 9). No estado de Pernambuco, é considerada Unidade de Planejamento Hídrico – UP 5 de acordo com classificação desenvolvida pelo Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH-PE). Sua área abrange 42 municípios inseridos completa ou parcialmente em seu perímetro, com um total de 6740,31 km<sup>2</sup>, dos quais 6262,78 km<sup>2</sup> estão no estado de Pernambuco e o restante no estado de Alagoas (APAC, 2018; CONDEPE/FIDEM, 2006).

Com extensão de 255 km, o rio Una nasce a uma altitude de 900 m, na serra da Boa Vista, município de Capoeiras. Com direção geral de curso oeste-leste, o rio apresenta regime intermitente até a cidade de Altinho de onde passa a ser perene (PERNAMBUCO, 1998).

Figura 9: Mapa de localização da bacia do rio UNA



Fonte: A autora (2019).

\*baseada em informações do IBGE

A bacia apresenta grande variedade de solos, com destaque para solos do cristalino e solos da faixa sedimentar litorânea. Nos dois terços superiores da bacia ocorrem os solos do cristalino como Planossolos, Regossolos, Vertissolos e Solos Litólicos. Já na faixa sedimentar litorânea observa-se a presença de Podzólicos Distróficos, Latossolos Distróficos e Areias Quartzosas Marinhas. Na parcela que fica no Litoral/Mata os solos são mais desenvolvidos, sendo, entretanto, mais suscetíveis à erosão devido ao relevo movimentado. Tal área possui histórico de cultivo da cana-de-açúcar e menos expressivamente de pastagem para animais (PERNAMBUCO, 1998).

No que concerne aos solos, Planossolos são pouco permeáveis, sendo capazes de gerar escoamentos representativos na maior parte das chuvas. Já os Regossolos são arenosos, medianamente profundos, apresentam elevada capacidade de infiltração, mas por serem pouco desenvolvidos, atingem o ponto de saturação rapidamente em chuvas mais fortes. Os Vertilossolos apresentam dois comportamentos hídricos, um quando está seco com elevada capacidade de absorção das primeiras chuvas, e outro quando molhado, assumindo lenta drenagem no perfil e lenta absorção das chuvas. Os solos Litólicos possuem alto poder de escoamento superficial quando da ocorrência de chuvas devido à sua baixa capacidade de retenção hídrica. E as Areias Quartzosas Marinhas, por serem excessivamente drenadas, absorvem bem as primeiras chuvas, sofrendo com a elevação do lençol freático nas áreas mais baixas, ao longo do período chuvoso (PERNAMBUCO, 1998).

No relevo, a altitude varia bastante de um extremo a outro da bacia. Na região mais oriental, próxima à costa, encontram-se uma faixa de planície, com cotas altimétricas abaixo dos 100 m, e outra composta por conjunto de morros e colinas de formato mamelonar. Mais a oeste desse trecho, nos municípios de Maraiial, Catende e Palmares as cotas chegam aos 300m. A partir desse ponto, subindo o planalto da Borborema localizam-se superfícies aplainadas de altitude entre 400 e 700m. E nos municípios de Capoeiras, Pesqueira e Jupí, na porção mais oeste da bacia, são observadas as cotas altimétricas mais elevadas, variando entre 800 e 1000m (CONDEPE/FIDEM, 2006).

Seguindo o perfil do relevo, outras características físicas variam no sentido longitudinal. O clima na área costeira, Zona da Mata, é quente e úmido, a precipitação é elevada, e os maiores índices são normalmente registrados no mês

de junho. Na vegetação é possível encontrar floresta perenifolia tropical atlântica, hoje muito modificada devido ao cultivo da cana-de-açúcar, mangues, restingas e coqueiros. Já a porção da bacia localizada na região Agreste caracteriza-se por ser uma área intermediária, apresentando a transição do regime litorâneo ao sertanejo. Na parte mais ocidental da bacia, próxima ao Sertão, o mês mais chuvoso é março e a cobertura vegetal apresenta semelhanças com a do semiárido, sendo possível encontrar espécies xerófilas e decíduas, com destaque para cactáceas e bromeliáceas (CONDEPE/FIDEM, 2006).

O regime de precipitações na bacia tende a ser de índices elevados no médio e baixo curso, com redução no alto curso. Essa porção mais alta da bacia, com área de aproximadamente 2900 km<sup>2</sup>, tem março como o mês mais chuvoso, precipitação média anual entre 600 e 800 mm, escoamentos intermitentes e grandes picos de inundação com média recorrência. Já o médio curso, com cerca de 2100 km<sup>2</sup>, registra os maiores eventos entre maio e agosto, com média anual de chuvas de 1500 mm. E o baixo curso, com área em torno dos 1700 km<sup>2</sup>, registra precipitação média anual de 2000 mm. Ainda é possível a ocorrência de chuvas originadas por sistemas atmosféricos, como as ondas de leste, que atingem toda a bacia. Tais eventos somados às grandes declividades presentes na topografia local colaboram para a elevada energia dos escoamentos e para os consecutivos danos causados a cidades ribeirinhas (RIBEIRO NETO et al., 2015).

A primeira ocupação da região na qual hoje se encontra a cidade de Palmares foi feita por um aldeamento de índios, conhecidos por Trombetas (do ramo tupi), ainda no início do século XIX. Tempos depois, o Governo Imperial fez doações de terras a uma família chamada Montes. Essas terras, nas margens do rio Una, passaram a ser conhecidas como o povoado dos Montes. A família por sua vez mandou construir um engenho, de nome Trombetas, e uma capela, que posteriormente viria a se tornar a Igreja Matriz de Palmares. Em 1862, cria-se a comarca de Palmares. Em 1873, a sede do município que era em Água Preta passa para a povoação dos Montes, agora elevada a categoria de vila. E em 1879, a vila de Palmares ganha foros de cidade. O nome utilizado até hoje veio do grande número de palmeiras presentes na região e também por seu território fazer parte da vasta área ocupada pelo célebre Quilombo dos Palmares (CONDEPE/FIDEM).

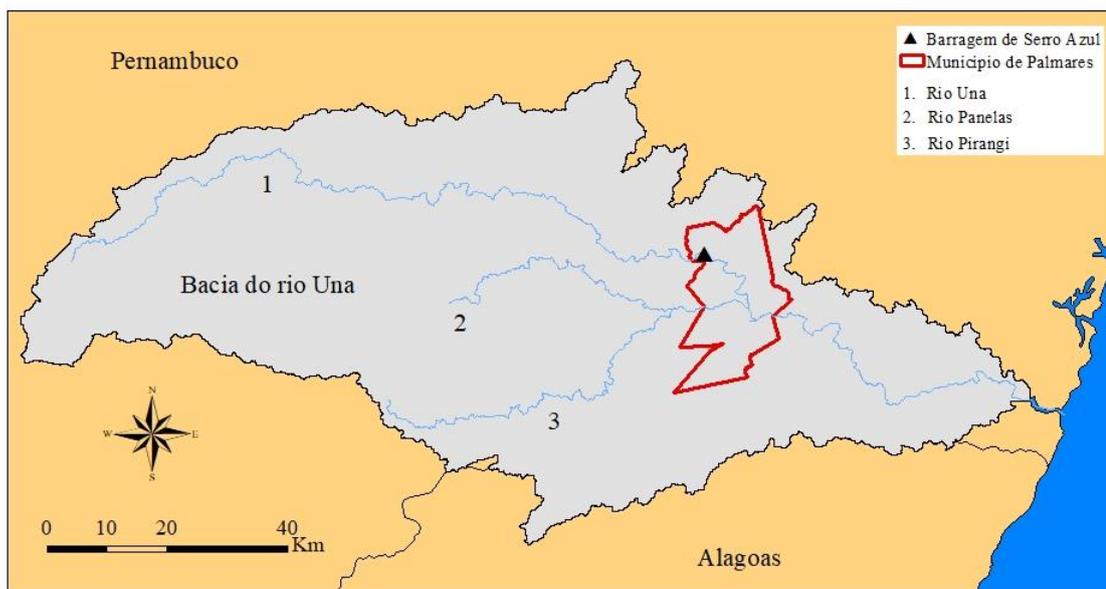
O município desenvolveu-se dentro do perímetro da bacia do rio Una, Zona da Mata Sul de Pernambuco, região com amplo histórico de cheias. Foco desta

pesquisa, Palmares conta com uma área de 339,3 km<sup>2</sup> e registrou no censo de 2010 uma população de 59.526 pessoas, com estimativa de crescimento para 63.500 habitantes no ano de 2020 (IBGE, 2018). Sob as coordenadas 8°41'00"S/35°35'30"W, e a uma altitude de 125 metros, Palmares se destaca por sua localização estratégica, estando próxima de capitais como Recife e Maceió, e de cidades do interior como Caruaru e Garanhuns. Com um forte setor comercial e de serviços, tem como uma de suas principais atividades econômicas a agroindústria açucareira (PREFEITURA DOS PALMARES, 2017).

Localizada nesse mesmo município, a barragem de Serro Azul foi implantada na bacia do rio Una com objetivo principal de conter inundações (Figura 10). Sua construção data do ano de 2017 e sua área de drenagem abrange 3299 km<sup>2</sup>. Com capacidade de represamento de 303 milhões de metros cúbicos, a barragem ainda é capaz de regularizar uma vazão de 850 l/s para demais usos como abastecimento humano, irrigação, lazer e pesca. Seu lago de 907 hectares de área conta com uma barragem auxiliar para evitar a fuga das águas, o que poderia acontecer devido à topografia local (ITEP, 2011; SRHE, 2019).

A estrutura principal da barragem consiste de sangradouro ampliado com extensão total de 360m e coroamento na cota 200,20m para passagem em segurança de cheias de 1000 anos, e sangradouro estrangulado de 25m de largura, na cota 198m, centralizado, dimensionado para permitir passagem de cheias de 100 anos. Além disso, tem-se a tomada d'água que possibilita passagem da vazão a ser regularizada e a galeria de descarga livre que permite o escoamento das águas do reservatório acima da cota 181 m, possibilitando a criação do volume de espera (ITEP, 2011).

Figura 10: Mapa de localização de Palmares



Fonte: A autora (2019).

\*baseada em informações do IBGE

### 3.2 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

Diante da realidade de escassez de dados referentes a desastres, indicadores de perigo se destacam pela possibilidade de medição e modelagem. A profundidade da água, por exemplo, extremamente relevante em análises de danos, e é uma variável que pode ser medida através de marcas deixadas nas paredes das construções após eventos de inundação. Além de ser um parâmetro também bastante acessível no que diz respeito à modelagem (KREIBICH et al., 2009). Indicadores de perigo, manchas de inundação e mapas são produtos dessa etapa que produzirão resultados isolados e também contribuirão para outros cálculos mais a diante.

Desenvolvido e disponibilizado pelo exército dos Estados Unidos para simulações dos processos de chuva-vazão, o HEC-HMS estrutura-se a partir de três componentes principais. O modelo de bacia, o modelo meteorológico e as especificações de controle. O primeiro refere-se à geometria da bacia hidrográfica e aos parâmetros de cada etapa do ciclo hidrológico, o segundo aos dados de precipitação, evapotranspiração e respectivas distribuições temporais, e as especificações aos períodos de tempo a serem simulados (SCHARFFENBERG et al., 2018).

Nesta pesquisa, é utilizado modelo da bacia do rio Una desenvolvido por pesquisadores do Grupo de Recursos Hídricos da UFPE como parte de um sistema de previsão de enchentes, o MAVEN (Monitor Avançado de Enchentes). Esse sistema integra modelagem hidrológica e hidrodinâmica, usando os softwares HEC-HMS e HEC-RAS (DANTAS, 2012; SILVA, 2015; ALVES, 2017). Já o modelo meteorológico e as especificações de controle foram modificados uma vez que a estimativa de danos aqui desenvolvida necessita de manchas de inundação para eventos com diferentes tempos de retorno.

A representação do escoamento por parte do HEC-HMS é feita por modelos matemáticos. Nesta pesquisa foram selecionados os seguintes métodos (SCHARFFENBERG et al., 2018; BATISTA, 2015; ALVES, 2017):

- Interceptação (Canopy): o método usado foi o Simple Canopy, que representa a cobertura vegetal, com a precipitação sendo totalmente interceptada até que se atinja a capacidade de armazenamento da copa das árvores, a partir de então toda a precipitação vai para a superfície ou diretamente ao solo;
- Preenchimento da superfície (Surface): demonstrando a superfície do solo onde se pode acumular água. O método utilizado foi o Simple Surface, que considera a captura de toda a precipitação que chega ao solo e infiltra. Apenas após atingir a capacidade de armazenamento e infiltração do solo é que a água passará ao escoamento superficial;
- Modelo de perda (Loss): Aqui se faz cálculo de retenção da água que não contribuirá diretamente para o escoamento superficial. O método adotado foi o Soil Moisture Accounting (SMA), o qual simula a dinâmica e armazenamento da água na superfície, vegetação e subsolo;
- Modelo de transformação (Transform): O método escolhido foi o Soil Conservation Service (SCS) Unit Hydrograph, cujo único parâmetro solicitado é o Lag Time, ou tempo do pico, que é o intervalo entre o centro de massa da precipitação e o tempo da vazão máxima. Esse modelo avalia o excesso de precipitação que se tornará escoamento superficial;
- Modelo de escoamento de base (Baseflow): define contribuições referentes à vazão de base após o término da precipitação. O método usado foi o Recession. Com dois parâmetros principais, a vazão de base inicial como descarga

com unidades de volume por tempo e a vazão de base inicial como volume por área por tempo;

- Modelo de propagação de cheia (Routing): realiza a propagação do escoamento nos canais principais do sistema. Muskingum-Cunge foi o método estabelecido, seus parâmetros físicos são obtidos a partir das características do canal.

Para o modelo meteorológico, os dados de chuva foram desenvolvidos através de hietogramas de projeto que são uma forma gráfica de demonstrar a variabilidade temporal de uma chuva, ou seja, a intensidade da chuva ao longo de sua duração. Os hietogramas de projeto são representações simplificadas muito usadas por sua simplicidade, baixa exigência no que concerne a quantidade de dados, recursos financeiros e tempo (BEMFICA et al., 2000).

O cálculo das chuvas de projeto é dependente do tempo de retorno, do tempo de concentração e da duração do evento que se busca simular. Para esta pesquisa foram definidos seis tempos de retorno diferentes (5, 10, 25, 50, 100 e 200 anos). Os tempos de concentração foram calculados (equação de Kirpirch) e conseqüentemente o tempo de pico para cada subbacia, equações 14 e 15. Para garantir a contribuição de toda a bacia, as durações foram sendo estabelecidas sempre maiores ou iguais aos tempos de concentração calculados (ANDRÉS, 2019).

$$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (14)$$

Sendo “ $t_c$ ” o tempo de concentração (minutos), “ $L$ ” o comprimento do rio (km), e “ $H$ ” a diferença de altura entre o ponto mais remoto do rio até seu exutório (m).

$$t_p = 0.6 \times t_c \quad (15)$$

Sendo “ $t_p$ ” o tempo de pico, ou Lag time, e “ $t_c$ ” o tempo de concentração, ambos em minutos.

Com a definição das durações de chuva, foram aplicadas curvas intensidade-duração-frequência (IDF) para os seis tempos de retorno definidos. Foram utilizadas equações deduzidas para municípios da zona da mata sul (ALCÂNTARA, 2018). No baixo curso, foi adotada a equação ajustada para o município de Palmares, e no

médio curso a equação do município de São Benedito do Sul (Figura 11). No alto curso, devido à falta de uma curva local, foi aplicada novamente a equação de São Benedito do Sul (ANDRÉS, 2019). No sentido de aprimorar a representação da precipitação nessa região, futuros aperfeiçoamentos deverão considerar a determinação de uma equação IDF que utilize dados de chuva do alto Una.

Figura 11: Alocação das equações IDF na bacia do rio Una



Fonte: Adaptado de ANDRÉS (2019).

Posteriormente, foi adotado o método dos blocos alternados, no qual as intensidades médias encontradas para os diferentes eventos de precipitação são transformadas em alturas de chuva, representando valores acumulados até o último intervalo. Os incrementos entre os valores acumulados são calculados e reorganizados de modo que o maior valor se localize em posição central no que concerne a duração. Os demais valores vão sendo dispostos de maneira alternada e em ordem decrescente, um à direita e outro à esquerda do bloco central (BEMFICA et al., 2000).

Os hietogramas gerados para as 51 subbacias do modelo geométrico e para os seis tempos de retorno diferentes foram inseridos no HEC-HMS, versão 4.3. Para as especificações de controle, a cada simulação, inicialmente o tempo de retorno selecionado era sempre o mesmo em todas as subbacias, considerando o princípio de que uma precipitação e o evento de inundação produzido têm o mesmo tempo de retorno. Já o intervalo de modelagem foi definido em 30 minutos uma vez que o

histórico de inundações bruscas no rio Una é extenso, com os picos ocorrendo de alguns minutos a algumas horas (ANDRÉS, 2019).

Por último, foi realizada outra simulação para os seis tempos de retorno estabelecidos, com a inserção do reservatório de Serro Azul no modelo hidrológico, de modo a avaliar sua influência. Sem alterar nenhum parâmetro, o reservatório é inserido através de dados referentes à sua geometria e dispositivos de descarga. Os hidrogramas gerados para cada tempo de retorno no HEC-HMS, com e sem o reservatório, foram utilizados como dados de entrada no modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

Desenvolvido pelo mesmo órgão do exército estadunidense, o HEC-RAS é um sistema composto por interface gráfica, componentes de análise hidráulica, ferramentas de armazenamento e gestão de dados, dentre outros. O HEC-RAS possibilita cálculos hidráulicos unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D), além de hidrodinâmica combinada 1D e 2D, para um canal ou rede inteira de canais. Também são possíveis estudos de transporte de sedimentos, análises de temperatura, qualidade da água, e mapeamento espacial de parâmetros computados como profundidade, elevação da superfície da água e velocidade (BRUNNER, 2016).

Em seu modo bidimensional, o modelo usa um algoritmo de solução de volumes finitos capaz de lidar com diferentes regimes de fluxo de forma mais robusta e tornando muito mais fácil o uso de áreas 2D para a modelagem de rios íngremes, por exemplo. Essa nova opção de área de fluxo 2D possibilita a modelagem com as equações completas de Saint Venant em duas dimensões (BRUNNER, 2016). Esta pesquisa utilizou o modelo HEC-RAS em sua versão 5.0.7, realizando modelagem não permanente bidimensional para os seis tempos de retorno adotados anteriormente, com e sem a inserção do reservatório de Serro Azul. Como observação destaca-se que o regime permanente seria uma possibilidade caso o interesse fosse apenas as vazões máximas, não sendo uma alternativa indicada para simulação de reservatórios no HEC-HMS.

A área de fluxo 2D foi definida com a criação de um polígono abrangendo toda a região de interesse, que neste caso é a sede do município de Palmares. Para a delimitação da área tomou-se por base o terreno, assim como imagens do próprio RAS Mapper (interface para processamento e visualização de dados geoespaciais no modelo). As condições de contorno selecionadas a montante foram os

hidrogramas calculados no HEC-HMS e a condição de contorno de jusante foi a profundidade normal (Normal Depth). Esta última requer uma inclinação de energia, para a qual se pode adotar, em substituição, a inclinação do fundo do canal ou da superfície da água. Neste trabalho, escolheu-se a primeira opção. As simulações utilizaram passo de tempo de 1 minuto e os resultados foram calculados para intervalos de 30 minutos.

Após os eventos de 2010, a Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE) do estado de Pernambuco contratou serviços de recobrimento aerofotogramétrico e perfilamento a laser para obtenção de uma base altimétrica de alta resolução. O Programa Pernambuco Tridimensional (PE3D) disponibiliza seus dados online de modo gratuito (CIRILO et al., 2014). O Modelo Digital de Terreno utilizado nesta pesquisa é um produto do I que passou por serviços de readequação da calha para compensar a falta da batimetria (ALVES, 2017).

Por fim, são obtidos mapas com foco nos indicadores de perigo. Estes últimos caracterizam o fenômeno natural extremo e exercem influência nos danos causados por inundações, de diferentes formas (KREIBICH et al., 2009). Os indicadores considerados nesta pesquisa são profundidade e extensão, uma vez que os danos avaliados estarão relacionados a aspectos estruturais de edificações residenciais. A extensão se dá pela área das manchas de inundação definidas para cada evento simulado, enquanto a profundidade pode ser reclassificada em níveis através de limiares listados na Tabela 3 (RIBEIRO NETO et al., 2016). Tais resultados foram obtidos no âmbito de projeto de pesquisa desenvolvido pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres (GEGEP).

Tabela 3: Limiares dos indicadores de perigo

| <b>Indicador</b> | <b>Baixo</b>               | <b>Médio</b>                  | <b>Alto</b>             |
|------------------|----------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Profundidade     | 0 – 0,60 m                 | 0,60 – 1,20                   | >1,20 m                 |
| Velocidade       | 0 – 0,60 m/s               | 0,60 – 1,20 m/s               | >1,20 m/s               |
| Intensidade      | 0 – 0,36 m <sup>2</sup> /s | 0,36 – 1,50 m <sup>2</sup> /s | >1,50 m <sup>2</sup> /s |
| Energia          | 0 – 1,0                    | 1,0 – 2,0                     | >2,0                    |
| Força de fluxo   | 0 – 1,0                    | 1,0 – 2,0                     | >2,0                    |

Fonte: Adaptado de RIBEIRO NETO et al. (2016).

### 3.3 ANÁLISE DE DANOS

A vulnerabilidade, intrinsecamente ligada à comunidade exposta e suas respectivas condições demográficas, é muitas vezes classificada através dos danos resultantes de inundações, principalmente no caso de análises quantitativas (ALBANO et al., 2017). Diversos fatores influenciam a quantidade e magnitude desses prejuízos, que podem ser contabilizados através de dados históricos ou sintéticos. No entanto, independentemente do método escolhido, existirão vantagens, desvantagens, incertezas e uma grande parcela de suposições. Neste contexto, as curvas cota-dano são a metodologia mais popular e difundida, pela qual se pode conhecer ou estabelecer o quão danificado serão os itens em cada altura de inundação (SALGADO, 1995).

Se na análise de perigo a validação da modelagem já é algo difícil pela falta de dados, na análise de danos a situação fica muito pior. Isso colabora para que esta seja uma das etapas com maior grau de incerteza em toda a avaliação de risco, e conseqüentemente uma das etapas menos realizadas. A validação tem por objetivo checar se os modelos de danos são capazes de estimar os prejuízos esperados para certa área e evento. Portanto, necessita-se de dados de alta qualidade coletados e compartilhados de modo padronizado (MOLINARI et al., 2019).

A ausência desses dados é uma realidade antiga, resultante principalmente das altas demandas por recursos financeiros, humanos e de tempo. No entanto, a necessidade de uma base de dados padronizados, confiáveis, comparáveis e consistentes é essencial para estudo do comportamento, variabilidade e conseqüentemente relação do dano com as características do evento extremo (NAGEM, 2008; MOLINARI et al., 2019). Assim, a ideia inicial foi desenvolver critérios para análise de danos em escala local, baseando-se majoritariamente em dados secundários.

#### 3.3.1 Equações

O cálculo da estimativa de danos é feito para a estrutura das residências e para bens pessoais, também conhecidos como inventário. Avaliando os dados

disponíveis pra região de estudo, foi escolhida a equação desenvolvida por Salgado (1995) e atualizada por Nagem (2008):

$$CRE = 0,50 \times CUB \times PED \times AIC \quad (16)$$

onde: CRE = Custo dos danos à edificação das residências; CUB = Custo unitário básico de construção; PED = Porcentagem da edificação danificada; AIC = Área inundada construída (m<sup>2</sup>) = 60% da Área total inundada. Uma importante característica da Equação (16) é a possibilidade de adequação para regiões diferentes daquela para onde foi desenvolvida inicialmente. Essa é a principal razão para a sua seleção dentre as equações já elaboradas para a realidade brasileira.

- **CUB**

A análise de danos de Salgado (1995) baseia-se em um imóvel padrão, residencial e unifamiliar. Nagem (2008) uniformiza tal metodologia ao adotar a NBR 12721/2005 e o Custo Unitário Básico (CUB) para caracterização das edificações. A norma, por sua vez, define projetos-padrão para diferentes tipos (p. ex. casa, prédio, galpão) e usos construtivos (p. ex. residencial, comercial, serviços), além da metodologia para cálculo do CUB. O CUB determina o custo do metro quadrado de cada um desses padrões e usos, sendo divulgado mensalmente pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil de cada estado brasileiro. Valores utilizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 4.

Alguns dos elementos utilizados para a categorização dos imóveis são a composição do edifício (ambientes existentes na planta e respectivas quantidades), o número de pavimentos, especificações de acabamento e o somatório de áreas, por exemplo. Destaca-se que, na equação, o CUB ainda é corrigido por um fator de depreciação física de 50%. Esta pesquisa busca utilizar os padrões estabelecidos em norma, apresentados na Tabela 5, para caracterizar a tipologia mais comumente identificada na área de estudo, residências unifamiliares.

Tabela 4: Custo Unitário Básico (PE, Jan 2021)

| <b>Classe</b> | <b>(R\$/m<sup>2</sup>)</b> |
|---------------|----------------------------|
| R1-B          | 1690,30                    |
| R1-N          | 2034,58                    |
| R1-A          | 2585,64                    |
| RP1Q          | 1541,08                    |

Fonte: CUSTO, 2021

Tabela 5: Características principais dos projetos-padrão

| Classe | Residência Unifamiliar   |      |                                                                                                                                                                                                                                                       |                                  |
|--------|--------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| C/D    | Residência Padrão Baixo  | R1-B | Residência composta de <b>dois</b> dormitórios, sala, banheiro, cozinha e área para tanque.                                                                                                                                                           | Área real: 58,64 m <sup>2</sup>  |
| B1/B2  | Residência Padrão Normal | R1-N | Residência composta de <b>três</b> dormitórios, sendo um suíte com banheiro, banheiro social, sala, circulação, cozinha, área de serviço com banheiro e varanda (abrigo para automóvel).                                                              | Área real: 106,44 m <sup>2</sup> |
| A      | Residência Padrão Alto   | R1-A | Residência composta de <b>quatro</b> dormitórios, sendo um suíte com banheiro e closet, outro com banheiro, banheiro social, sala de estar, sala de jantar e sala íntima, circulação, cozinha, área de serviço completa e varanda (abrigo automóvel). | Área real: 224,82 m <sup>2</sup> |
| E      | Residência Popular       | RP1Q | Residência composta de <b>um</b> dormitório, sala, banheiro e cozinha.                                                                                                                                                                                | Área real: 39,56 m <sup>2</sup>  |

Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2006).

- **PED**

A Porcentagem da Edificação Danificada (PED) é um valor tabelado, ver Tabela 6 (SALGADO, 1995; NAGEM, 2008). Cada porcentagem está associada a uma altura de inundação, a um padrão construtivo e a um índice médio de quantificação da extensão do dano determinado computacionalmente e com a ajuda de especialistas da construção civil. Os prejuízos só começam a ser contabilizados a partir de profundidades superiores a 0,50 m, pois as construções normalmente contam com uma base elevada em relação ao meio fio, estando este último também a certa altura das vias.

Tabela 6: Porcentagem da edificação danificada (PED)

| Código | Alturas de inundação (m) |                        |                        |                        |                        |                        |
|--------|--------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|        | <b>0,50 a<br/>0,75</b>   | <b>0,75 a<br/>1,00</b> | <b>1,00 a<br/>1,50</b> | <b>1,50 a<br/>2,00</b> | <b>2,00 a<br/>2,50</b> | <b>2,50 a<br/>3,00</b> |
| R1-A   | 0,095                    | 0,164                  | 0,170                  | 0,196                  | 0,210                  | 0,216                  |
| R1-N   | 0,056                    | 0,130                  | 0,137                  | 0,167                  | 0,183                  | 0,198                  |
| R1-B   | 0,042                    | 0,133                  | 0,137                  | 0,164                  | 0,173                  | 0,185                  |
| RP1Q   | 0,040                    | 0,142                  | 0,147                  | 0,174                  | 0,183                  | 0,197                  |

Fonte: NAGEM (2008).

- **AIC**

A Área Inundada Construída (AIC) em metros quadrados é para Nagem (2008) um valor médio de 60% da área total do lote. Tal valor foi definido pela autora de acordo com o padrão de urbanização de seu local de estudo, no caso Rio de Janeiro, juntamente com a média de ocupação das edificações. Em Palmares, a metodologia utilizada para vetorização permitiu conhecer o valor exato da ocupação de cada terreno, juntamente ao valor inundado de cada residência graças à simulação com o modelo HEC-RAS. Nesta pesquisa, o AIC corresponde às áreas de cobertura de cada lote.

Já para a quantificação de danos a bens pessoais, o que alguns autores nomeiam de inventário, foi usada a equação 17 (SALGADO, 1995; NAGEM, 2008). A tabela 7 apresenta os itens contabilizados num imóvel padrão, base para o cálculo. A lista foi atualizada com a edição de alguns itens e retirada de outros,

pouco ou não utilizados atualmente. Os valores adotados são resultado de uma pesquisa de mercado feita em sites de grandes lojas do ramo, no mês de Março de 2019. Para cada item foram verificados os preços mais baixos, mais altos e os medianos, escolhendo os mais baixos de modo a manter a estimativa mais conservadora. Demais itens pessoais não listados entram como um acréscimo de 15 % do valor final. O imóvel padrão pertence à classe B1/B2, área de 106,44m<sup>2</sup>. Para as outras classes, foi utilizado um fator multiplicador com base na pontuação máxima de cada classe definida pela ABEP (2019), como apresentado na Tabela 8 (TACHINI, 2010; NAGEM, 2008). Diante das características locais, foram usados fatores multiplicadores referentes à classe B2.

$$\text{CRC} = ((0,5 * \text{CCIP} * \text{Fm}) / \text{AIP}) \times \text{AIC} \quad (17)$$

onde: CRC = Custo dos danos de conteúdo das residências; CCIP = Custo dos conteúdos do imóvel padrão (R\$); AIP = Área do Imóvel padrão B (m<sup>2</sup>); Fm = Fator multiplicador; AIC = Área inundada construída (m<sup>2</sup>)

Tabela 7: Itens do conteúdo da residência padrão

| Cômodo        | Item                             |
|---------------|----------------------------------|
| Sala de Estar | Sofá de 2 lugares                |
|               | Sofá de 3 lugares                |
|               | Mesa de centro                   |
|               | Estante                          |
|               | Armário baixo (rack)             |
|               | Ventilador                       |
|               | Televisão                        |
|               | DVD                              |
|               | Micro system                     |
|               | Notebook <sup>1</sup>            |
|               | Rack do computador <sup>**</sup> |
|               | Mesinha                          |
|               | Telefone <sup>**</sup>           |

|                    |                                 |
|--------------------|---------------------------------|
|                    | Luminária de mesa               |
| Sala de Jantar     | Conjunto de mesa e 6 cadeiras   |
|                    | Armário baixo (Buffet)          |
| Quarto de casal    | Cama de casal <sup>2</sup>      |
|                    | Colchão de casal**              |
|                    | Armário duplex                  |
|                    | TV                              |
|                    | Cômoda                          |
|                    | Telefone**                      |
|                    | Mesa de cabeceira (2 unid)      |
|                    | Luminária de mesa               |
|                    | Rádio relógio**                 |
| Quarto de solteiro | Cama de solteiro <sup>2</sup>   |
|                    | Colchão de solteiro**           |
|                    | Armário duplex                  |
|                    | Cômoda                          |
|                    | Mesa de cabeceira               |
|                    | Luminária de mesa               |
|                    | Rádio relógio**                 |
|                    | Mesa de estudo                  |
|                    | Cadeira                         |
| Ventilador         |                                 |
| Cozinha            | Armário de cozinha balcão       |
|                    | Armário de cozinha<br>paneleiro |
|                    | Armário de cozinha parede       |
|                    | Conjunto de mesa e 4 cadeiras   |
|                    | Fogão                           |
|                    | Depurador                       |
|                    | Forno elétrico**                |
| Microondas         |                                 |

|                 |                        |
|-----------------|------------------------|
|                 | Geladeira              |
|                 | Freezer**              |
|                 | Torradeira             |
|                 | Liquidificador         |
|                 | Batedeira              |
|                 | Lavadoura de louças    |
|                 | Cafeteira              |
| Área de serviço | Lavadora de roupas     |
|                 | Ferro de passar roupas |
|                 | Aspirador de pó        |

\*\*Item retirado <sup>1</sup>Substituindo o microcomputador <sup>2</sup>Foi orçado como cama box, já com o colchão

Fonte: Adaptado de NAGEM (2008).

Tabela 8: Fator multiplicador dos conteúdos do imóvel padrão (Fm)

| Classe | Fator multiplicador<br>(Imóvel padrão B1) | Fator multiplicador<br>(Imóvel padrão B2) |
|--------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| A      | 2,27                                      | 2,70                                      |
| B1     | 1,00                                      | 1,19                                      |
| B2     | 0,84                                      | 1,00                                      |
| C1     | 0,64                                      | 0,76                                      |
| C2     | 0,50                                      | 0,59                                      |
| D      | 0,36                                      | 0,43                                      |
| E      | 0,36                                      | 0,43                                      |

Fonte: ABEP (2019).

### 3.3.2 Cadastro

Imagens de alta qualidade, cedidas pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco, com 20 cm de resolução espacial, permitiram o desenvolvimento de uma base planimétrica de parte da área urbana de Palmares. A vetorização de lotes e quadras foi realizada em ambiente SIG, o que possibilitou a criação de um banco de dados georeferenciados acerca dos itens levantados. O preenchimento da tabela de atributos foi realizado com auxílio do aplicativo Google Street View, recurso do Google Maps e Google Earth que disponibiliza vistas panorâmicas, possibilitando visualização de locais ao nível do solo. Para Palmares,

no momento da vetorização, as vistas derivadas do Google Street View (GSV) datavam do ano de 2012. A tabela de atributos criada identifica cada edificação por rua, número, tipo, uso, número de pavimentos, área de coberta, padrão construtivo e quantidade de unidades, no caso de residências (Apêndice A).

Para identificação dos padrões construtivos, o primeiro parâmetro utilizado foi a área construída de cada lote. Essas áreas foram calculadas em ambiente SIG através de imagens de alta resolução cedidas pela Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco. Posteriormente, foram realizadas visitas de campo para validação dessa primeira classificação e levantamento de um segundo elemento classificador, o programa arquitetônico (quais e quantos os ambientes existentes na residência).

As visitas a campo foram realizadas por equipe de duas pessoas, entre os meses de Julho e Agosto de 2019. Com a aplicação de 150 entrevistas no total (Apêndice B), a amostra tem um nível de confiança de 90% e margem de erro de 6,46%, de acordo com a equação 18. A coleta dos dados foi realizada com o suporte do aplicativo para Android DataScope. O DataScope é uma plataforma colaborativa que permite a confecção e compartilhamento de formulários, além da aquisição de dados offline, para posterior sincronização (Figura 12). Além dos formulários individuais, o aplicativo permitia obtenção de fotos e exportação dos resultados em arquivo CSV e PDF (Apêndice C).

Como o produto dos questionários visava validar a classificação dos padrões residenciais, cogitou-se selecionar previamente as casas a serem visitadas, de modo a possibilitar que todos os padrões construtivos fossem contemplados de maneira equilibrada. No entanto, a ausência do morador ou a recusa em responder às perguntas foram algumas das dificuldades encontradas em campo. Dessa forma, as casas foram selecionadas de maneira aleatória. E como foram realizadas três visitas, em cada uma delas buscou-se cobrir uma área diferente da cidade de modo a representar sua diversidade.

$$n = \frac{Z^2 * p(1 - p)}{1 + \left(\frac{Z^2 * p(1 - p)}{e^2 N}\right)} \quad (18)$$

Sendo “n” o tamanho da amostra, “Z” score (tabelado), “p” o desvio padrão, “e” a margem de erro e “N” o tamanho da população.

Figura 12: Interface do aplicativo DataScope (formulários)

The figure displays four sequential screenshots of the DataScope application interface, each showing a different form screen. The screens are:

- Screen 1:** Titled "Foto da fachada com número da resid...". It features a "TERMINAR" button at the top left and a list of form fields: "Foto da fachada com número da residência", "Rua", "Nº da casa", "Programa Arquitetônico", "O morador lembra de alguma enchente?", and "Observações".
- Screen 2:** Titled "Rua". It contains a text input field with the placeholder "Escreva texto aqui ...".
- Screen 3:** Titled "Nº da casa". It features a numeric selection field with the placeholder "Selecione o número ...".
- Screen 4:** Titled "Programa Arquitetônico". It includes a search bar for "Programa Arquitetônico..." and four sections for selecting the number of rooms: "Dormitórios", "Suíte", "Sala de estar", and "Sala de jantar". Each section has a row of five checkboxes labeled 0, 1, 2, 3, and 4 ou +.

Each screen has a bottom navigation bar with "ANTERIOR" and "PRÓXIMO" buttons, and a central menu icon.

Fonte: A autora (2019).

### 3.4 DADOS CENSITÁRIOS NA ANÁLISE DE VULNERABILIDADE

Os mapas de exposição identificam elementos afetados por eventos de inundação de acordo com seus determinados tempos de retorno. O quanto esses elementos estão passíveis de sofrer danos devido a uma inundação define a vulnerabilidade dos mesmos. Assim, através da sobreposição de informações (uso do solo, censo, etc.) acerca dos elementos expostos, identificam-se quantos e quais podem ser afetados, estimando seu valor de ativo. Normalmente têm-se avaliações econômicas realizadas com a distinção de classes homogêneas, observando a escala da análise e a disponibilidade de dados, adotando uma mesma curva para cada classe quando da avaliação de danos e produzindo conseqüentemente mapas que refletem essas categorias (ALBANO et al., 2017; MERZ et al., 2010).

Na engenharia, a vulnerabilidade pode ser interpretada através dos custos (ALBANO et al., 2017). Já ao se considerar a dimensão social da vulnerabilidade não se pode negligenciar as características relacionadas à sociedade em estudo. No caso de residências, por exemplo, renda e nível de instrução familiar são alguns dos fatores que terão influência na qualidade das mesmas e consecutivamente em sua resposta a fenômenos extremos. Famílias mais pobres provavelmente terão moradias mais frágeis que aquelas com uma renda melhor. Nota-se que aspectos sociais fazem-se presentes nas várias dimensões da vulnerabilidade (GOERL et al., 2012).

Assim como em Penning-Rowell & Chatterton (1977) esta pesquisa é realizada com foco na escala do lote considerando os efeitos da inundação nos

diferentes tipos construtivos, principalmente no que concerne a danos. Isso se faz de modo a minimizar possíveis dificuldades com a modelagem, além de buscar diminuir o grau de incerteza dessa etapa. No entanto, para a incorporação de fatores sociais, as informações disponíveis encontram-se na escala do setor censitário, menor unidade amostral espacial para essa base de dados.

Foram selecionados, do Censo Demográfico do IBGE, os indicadores renda domiciliar, idade e total de moradores em domicílios particulares e coletivos. No item idade, foram priorizadas as classes mais vulneráveis, crianças abaixo dos 10 anos e idosos acima dos 60 (LIMA & BONETTI, 2018). Por apresentarem intervalos de valores muito diferentes, as variáveis foram normalizadas de modo a permitir sua combinação e a continuação dos cálculos. Para variáveis que influenciam de modo diretamente proporcional (total de moradores e idade) foi utilizada a equação 19, e para as que contribuem de modo indireto (renda por domicílio) foi usada a equação 20.

$$x = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (19)$$

$$x = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (20)$$

Sendo “x” a variável em estudo, “x<sub>min</sub>” menor valor registrado, “x<sub>max</sub>” o maior valor registrado para tal variável.

O “x” das equações 19 e 20 é substituído pelos indicadores sociais do IBGE selecionados para estudo, de modo que os mapas finais possuam a mesma escala e faixa de variação, permitindo assim combinações, comparações e demais análises. Nesta pesquisa, para a densidade de moradores, a faixa etária e os danos usa-se a equação 19, enquanto para a renda é aplicada a equação 20. A densidade de moradores contribui de maneira diretamente proporcional para o índice de vulnerabilidade, assim como a quantidade de pessoas dentro da faixa etária selecionada. Na ocasião de um evento, tais regiões apresentariam uma população maior a ser deslocada e uma maior quantidade de pessoas possivelmente com menor capacidade de locomoção. Já o indicador renda por domicílio contribui de

modo inversamente proporcional, quanto maior o rendimento, menor a vulnerabilidade. A renda influencia nas condições de moradia tanto antes quanto depois da ocorrência de um desastre, podendo limitar as possibilidades de resposta dessas famílias. Desse modo, nos mapas, quanto mais próximo de 1, maior a densidade populacional, maiores os danos, maior a quantidade de pessoas até 10 anos e acima dos 60, e menor a renda domiciliar. O contrário vale para os valores próximos a zero, como ilustrado pelo esquema da Figura 13.

Figura 13: Normalização dos indicadores de vulnerabilidade

|                                                                                                                    |   |       |   |                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------|---|---------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Variável</b></li> </ul>                                                  |   |       |   |                                       |
| Menos vulnerável                                                                                                   | 0 | ----- | 1 | Mais vulnerável                       |
|                                                                                                                    |   | -     |   |                                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Total de moradores em domicílios particulares e coletivos</b></li> </ul> |   |       |   |                                       |
| Menor densidade                                                                                                    | 0 | ----- | 1 | Maior densidade                       |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Pessoas abaixo de 10 e acima dos 60 anos</b></li> </ul>                  |   |       |   |                                       |
| Menor número de pessoas nessas faixas                                                                              | 0 | ----- | 1 | Maior número de pessoas nessas faixas |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Danos a edificações residenciais</b></li> </ul>                          |   |       |   |                                       |
| Menor quantidade de danos                                                                                          | 0 | ----- | 1 | Maior quantidade de danos             |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Renda mensal por domicílio</b></li> </ul>                                |   |       |   |                                       |
| Maior renda                                                                                                        | 0 | ----- | 1 | Menor renda                           |
|                                                                                                                    |   | -     |   |                                       |

Fonte: A autora (2021).

### 3.5 ÍNDICE DE RISCO

Quantitativamente o risco médio estará representado pelos danos estimados para as diferentes probabilidades de inundação. Nesta pesquisa, danos tangíveis diretos referentes a fatores econômicos. Qualitativamente, o risco será também apresentado a partir da normalização dos valores calculados, com classificação em quatro classes iguais. Os intervalos são de 0 a 0,25 (baixo risco), 0,25 a 0,5 (risco

moderado), 0,5 a 0,75 (alto risco), e de 0,75 a 1 (muito alto risco). O risco em níveis se apresenta de modo simples, favorecendo a comparação entre diferentes cenários, áreas de aplicação e tendências no tempo, além de facilitar sua interpretação e comunicação (ALBANO et al., 2017). O risco é então apresentado em sua forma numérica, através das curvas, e de modo mais qualitativo e espacialmente distribuído, através dos mapas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de risco é necessária à gestão que se propõe a enfrentar cenários de desastre. Ações ou omissões podem exercer influência significativa nos impactos resultantes. Este capítulo apresenta os resultados obtidos pela pesquisa, dentre os quais estão elementos do banco de dados em ambiente SIG, a análise de influência da barragem de Serro Azul na estimativa de danos, e a construção de curvas de risco em escala local.

### 4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

A análise de perigo caracterizada pela modelagem atua na simulação de eventos extremos, estimativa de áreas vulneráveis, planejamento da gestão de risco e determinação da distribuição espacial de variáveis de interesse, dentre outros (ONGDAS et al., 2020). Modelos hidrológicos e hidrodinâmicos, unidimensionais e bidimensionais são ferramentas primordiais na avaliação de impactos de inundações (ALVES et al., 2017). Escala e eficiência computacional são alguns dos elementos a serem observados na modelagem, enquanto complexidade e incertezas são alguns dos desafios a serem enfrentados (BATISTA et al., 2020).

#### 4.1.1 Chuvas e calibração do HEC-HMS

Para calibração da modelagem, foram usados como referência valores de vazão obtidos de análise regional de frequência de precipitações diárias para diferentes durações na bacia do rio Una. Com foco na área urbana de Palmares, o objetivo desta pesquisa, por sua vez, foi então encontrar valores de vazão máxima do hidrograma no HEC-HMS que produzissem valores de vazão máxima no HEC-RAS, o mais próximo possível dos valores de referência de Dantas et al. (2014), Tabela 9.

As primeiras simulações hidrológicas, no entanto, produziram vazões quase oito vezes maiores que o esperado. Para corrigir essa superestimação dos resultados, buscaram-se alternativas nas chuvas de projeto, aumentando intervalos de modo a tentar retardar o pico do hietograma, mas sem sucesso. Cogitou-se então que o problema estivesse na premissa de que um evento de chuva de tempo de

retorno específico produziria um evento de inundação de mesmo tempo de retorno, visto que até então o tempo de retorno de uma simulação era o mesmo para todas as 51 sub-bacias. Considerando os quase 7000 km<sup>2</sup> da bacia do rio Una, observou-se que as tempestades poderiam afetar parcelas dessa região de modo diverso. O passo seguinte foi então testar as chuvas de projeto em diferentes combinações de tempos de retorno para diferentes sub-bacias (ANDRÉS, 2019).

O primeiro teste seguiu um cenário desenvolvido por Dantas (2012) em seu estudo de valores do índice de precipitação padronizada (SPI) de séries de chuva. Tal cenário era caracterizado por chuvas fracas/leves no alto curso do rio Una, chuvas moderadas no médio curso e chuvas severas/extremas no baixo curso. Um segundo teste foi realizado com cenário aleatório obtido através de aplicação da linguagem SQL. Todos os hietogramas foram inseridos num sistema de gerenciamento de banco de dados (MySQL) e foi criada uma rotina simples para a combinação dos diferentes tempos de retorno. Posteriormente, foi selecionada aleatoriamente uma dessas combinações e aplicada ao HEC-HMS. No entanto, nenhum desses testes produziu efeito satisfatório na redução do pico das vazões simuladas.

Por fim, foi utilizado um recurso do próprio HEC-HMS (Flow Ratio) para controle da taxa de fluxo nas sub-bacias (BATISTA & RIBEIRO NETO, 2020). Flow Ratio é uma ferramenta de edição do modelo que permite ao usuário controlar o fluxo em cada sub-bacia. Define-se um fluxo mínimo ou um fator de fluxo que irá regular os hidrogramas inseridos diretamente pelo usuário ou através de base de dados acoplada, o HEC-DSS. O fator de fluxo, uma vez definido, é então multiplicado por todas as ordenadas do hidrograma, produzindo vazões de saída proporcionais. Essa é uma ferramenta muito comum em análises de sensibilidade, por exemplo, (BRUNNER, 2016).

Após alguns testes, foi encontrado o melhor ajuste para o valor do Flow Ratio e conseqüentemente das vazões. Os resultados foram satisfatórios uma vez que as vazões obtidas através das simulações realizadas no HEC-HMS e consecutivamente no HEC-RAS apresentaram valores próximos das vazões máximas de Dantas et al. (2014) usadas como referência, Tabela 9. Depois de calibrados, os mesmos parâmetros foram utilizados para as simulações com inserção do reservatório de Serro Azul.

Tabela 9: Vazões máximas simuladas para calibração em Palmares

| Tempo de retorno (anos) | Vazões de referência sem reservatório (m <sup>3</sup> /s) | Vazões simuladas sem reservatório no HEC-HMS (m <sup>3</sup> /s) | Vazões simuladas sem reservatório no HEC-RAS (m <sup>3</sup> /s) |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| 5                       | 475                                                       | 563.4                                                            | 535.32                                                           |
| 10                      | 638                                                       | 704.8                                                            | 670.48                                                           |
| 25                      | 818                                                       | 938.3                                                            | 898.26                                                           |
| 50                      | 1088                                                      | 1143.7                                                           | 1096.58                                                          |
| 100                     | 1320                                                      | 1382.6                                                           | 1335.05                                                          |
| 200                     | 1570                                                      | 1656.3                                                           | 1606.92                                                          |

Fonte: A autora (2020).

#### 4.1.2 Calibração do HEC-RAS

Para testar a sensibilidade da modelagem 2D no HEC-RAS, foi simulado um mesmo evento para diferentes condições. Os parâmetros analisados foram o tamanho das células da malha 2D, o coeficiente de Manning e o uso de breaklines. Estas últimas são um artifício do modelo para forçar o alinhamento das células da malha e controlar a direção do fluxo. Breaklines podem ser usadas ao longo de qualquer terreno mais alto, diques, estradas, ou até por toda a extensão das margens do canal principal (BRUNNER & CEIWR-HEC, 2016).

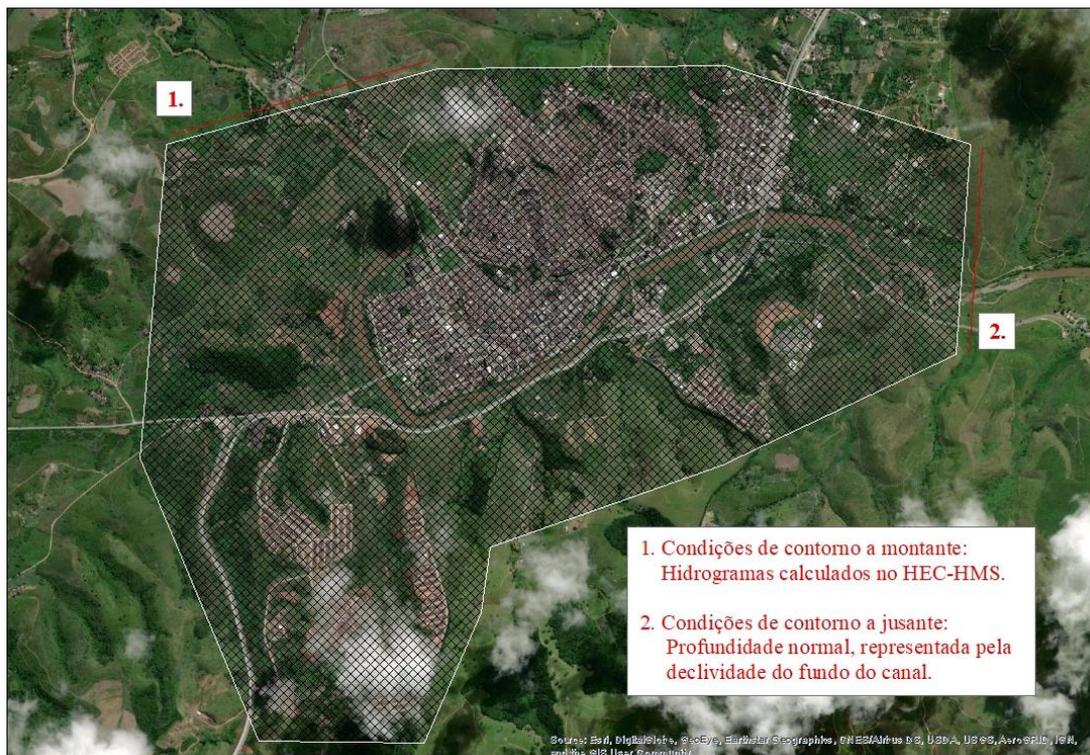
Os valores adotados inicialmente, tanto para a malha quanto para o coeficiente de rugosidade, foram obtidos de trabalhos prévios de referência para a mesma região (LIMA NETO, 2019; ALVES, 2017; RIBEIRO NETO et al., 2015), e posteriormente comparados a outros valores extremos. Os testes foram realizados com três malhas formadas por quadrículas regulares (15, 40 e 75m), três valores para o coeficiente de Manning (0.035, 0.06, 0.1) e a inserção ou não de breaklines.

Constatou-se que o tamanho da malha não influenciou de modo significativo nos resultados, mas contribuiu bastante para o tempo de simulação. Os cálculos para a malha com células de 15 x 15m requisitaram aproximadamente 7 horas e apresentaram pequenas instabilidades no fim do hidrograma simulado. Já a malha de 40 x 40 m consumiu entre 15 e 20 minutos, e a malha de 75 x 75 m levou em média 5 minutos para concluir as simulações. A diferença entre as cotas simuladas

pelas diferentes malhas não foi significativa. No que concerne aos outros parâmetros avaliados, nem os diferentes valores de Manning, nem as breaklines interferiram nos resultados das simulações expressivamente.

De modo semelhante, estudos que analisam o desempenho da modelagem 2D com o HEC-RAS chegaram às mesmas conclusões. Ongdas et al. (2020) destacam a relação entre o grau de precisão e o custo computacional como fator determinante para o desenho da malha, notando que malhas grosseiras permitem simulações mais rápidas. Enquanto malhas de quadrículas menores podem representar melhor o terreno, requisitando, porém muito mais tempo de cálculo. Os autores compararam os mesmos três parâmetros e concluíram que o coeficiente de Manning, a introdução de breaklines e o tamanho da malha não produzem melhora significativa no desempenho do modelo. A escolha da malha é então feita com base no melhor desempenho e melhor tempo de simulação obtido sem comprometimento da qualidade dos resultados.

Figura 14: Malha para simulação 2D no HEC-RAS.



Fonte: A autora (2021).

Nesta pesquisa, adotou-se malha computacional de células regulares quadradas (40 x 40 m), linhas para inserção das condições de contorno (Figura 14)

e tempo de simulação de 1 minuto, como em Alves (2017) e Lima Neto (2019). Registra-se que só foi possível simular sem instabilidades no modelo com intervalos de 1 minuto ou menos. A escolha desse valor se deu então uma vez que, acima de 1 minuto, quanto maiores os valores adotados, maiores as deformações apresentadas nos hidrogramas de saída, e abaixo de 1 minuto, as simulações demonstraram acréscimos apenas em tempo de processamento e não em qualidade. O passo de cálculo e apresentação dos resultados foi de 30 minutos.

Costabile et al. (2020) corroboram para as mesmas conclusões acerca da resolução da quadrícula em relação à obtenção dos hidrogramas de inundação, adicionando que malhas com células de melhor resolução não são particularmente viáveis para estudos práticos por resultarem em uma duração muito maior que a do evento real. Os autores alertam para a necessidade de mais investigações e de estudos de caso, mas afirmam a confiabilidade do HEC-RAS, através de análise comparativa do desempenho de diferentes modelos, para casos em que não há dados observados de precipitação, área inundada e vazão.

As simulações realizadas nesta pesquisa adotaram a equação de Onda Difusa. Shustikova et al. (2019) justificam a escolha da equação de Onda Difusa ao invés da equação Completa do Momento por apresentar soluções numéricas mais estáveis e menor tempo computacional. De modo semelhante fez Ongdas et al. (2020), com simulações aproximadamente vinte vezes mais rápidas para Onda Difusa. Shustikova et al. (2019) abordam outras questões intrínsecas à modelagem nas novas versões do HEC-RAS como o surgimento de ilhas na mancha de inundação, ou inundação fragmentada.

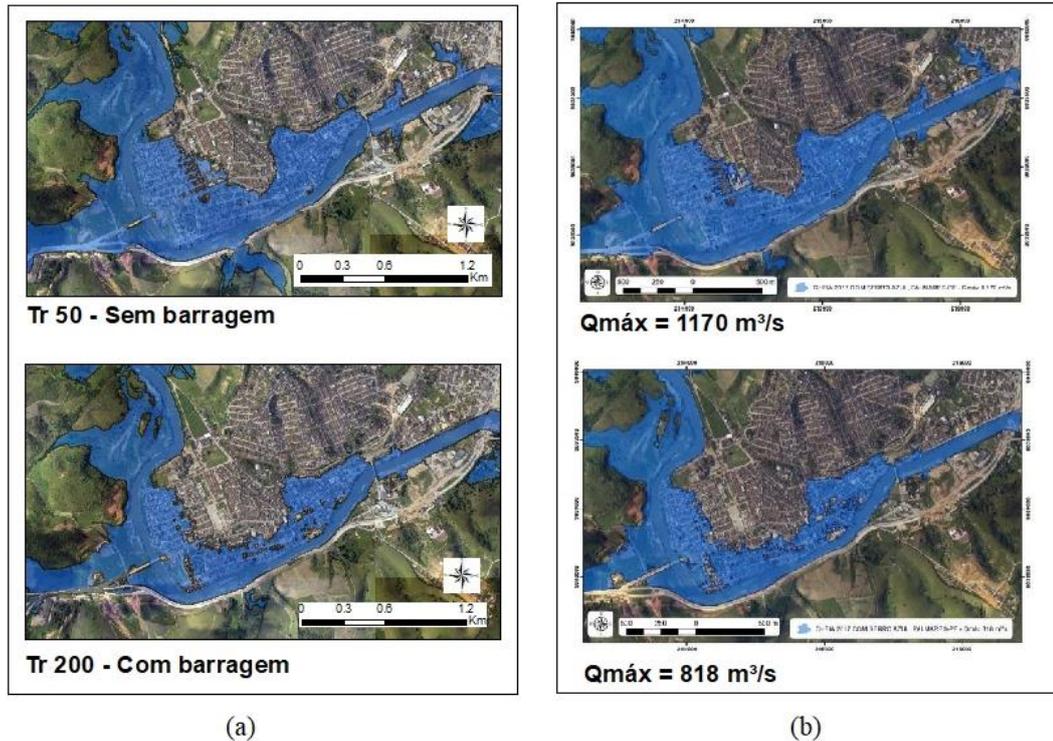
Observadas tanto nesta pesquisa quanto na literatura, as ilhas podem ser secas ou molhadas e são resultantes de configurações do próprio HEC-RAS. O modelo tem dificuldade em produzir um padrão contínuo de inundação. A fragmentação, portanto é um fenômeno gráfico presente em profundidades muito rasas, tendendo a desaparecer à medida que as profundidades aumentam. Computacionalmente, um gradiente da superfície da água será produzido entre os centros das células, mas ao plotar resultados no RAS Mapper, uma única elevação média de superfície da água será usada para cada célula. Se a profundidade for muito baixa, podem aparecer porções secas entre porções úmidas, resultando em inundação fragmentada (ONGDAS et al., 2020; COSTABILE et al., 2020; GOODELL, 2015).

Esta etapa foi além do estudo dos fenômenos naturais em si, admitindo que é importante buscar entender o funcionamento do modelo uma vez que o mesmo interfere diretamente nos produtos da modelagem e conseqüentemente nas análises. Neste sentido, Shustikova et al. (2019) destacam mais uma vez que a forma como o HEC-RAS distribui a água dentro das células acaba originando situações como a inundação fragmentada, podendo resultar em limitações no cálculo da extensão e em alguns casos na distribuição dos valores de profundidade da água.

No que concerne a profundidades, uma alternativa para a calibração de modelos hidráulicos é proposta por Ribeiro et al., 2020 através da análise da aplicabilidade de celulares como ferramenta de suporte técnico para a coleta de dados georeferenciados de inundações. Pontos coletados através do GPS de celulares provaram-se eficazes na estimativa da área de inundação para evento ocorrido na bacia do rio Una. Dos 95 pontos coletados por GPS, 51.6% apresentaram erro planimétrico de 5 m, 34.8% tiveram erro entre 5 e 10 m, e apenas 7.4% registraram erro acima dos 15 m. O aplicativo ainda permite que o usuário forneça informações acerca da profundidade da água, de modo rápido com base em alguns itens de referência como altura de portas, peitoril de janelas, e do próprio terreno.

Em Shustikova et al. (2019), por questão de confiabilidade dos pontos levantados em campo, os autores preferiram tratar os resultados como uma comparação relativa entre dois modelos em vez de comparar valores absolutos observados e simulados. Da mesma forma, nesta pesquisa, busca-se comparar os mapas gerados com outras manchas encontradas na literatura para a mesma área de estudo. Alves et al. (2017), por exemplo, gera, com o HEC-RAS 2D, mapa de inundação para um evento ocorrido com vazão máxima de pico observada de 818 m<sup>3</sup>/s considerando a barragem de Serro Azul, e outro mapa sem barragem com vazão de pico estimada de 1170 m<sup>3</sup>/s. Nesta pesquisa, tais mapas apresentam resultados equivalentes às planícies geradas para evento de pouco mais de 200 anos com barragem e de 50 anos sem barragem, respectivamente (Figura 16).

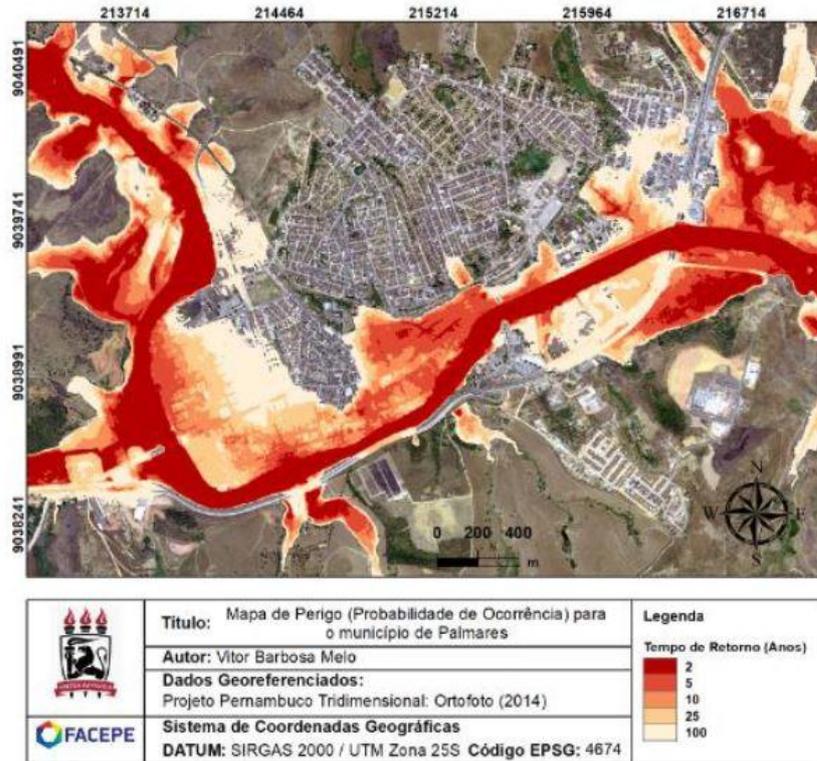
Figura 15: Comparativo de manchas de inundação



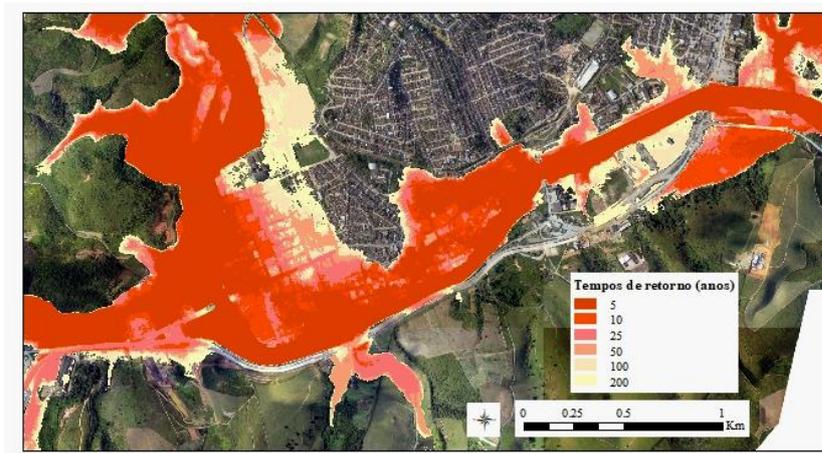
Fonte: (a) A autora (2021); (b) ALVES et al. (2017).

Já Melo (2021) é responsável pela geração de mapas de perigo (2, 5, 10, 25, 50 e 100) para Palmares através de análises de frequência de nível e do modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage). Este último utiliza o dado topográfico como único dado de entrada estando, portanto, sua resolução espacial intrinsecamente relacionada ao resultado da simulação. Como destacou o próprio Melo (2021), a verificação do desempenho dos mapas é limitada pela falta de dados observados e pelas incertezas envolvidas em seu processo de estimativa dos tempos de retorno. Com os mapas de Melo (2021) e os produzidos por esta pesquisa (Figura 17) pode-se, no entanto fazer uma comparação relativa entre modelos como observado por Shustikova et al. (2019).

Figura 16: Comparativo de manchas de inundação para os diferentes tempos de retorno



(a)



(b)

Fonte: (a) A autora (2021); (b) MELO (2021).

#### 4.1.3 Contribuição da barragem (picos de vazão)

Dentre os diversos usos de um reservatório, pode-se citar a produção de energia, a regulação de fluxos, o abastecimento de água e o controle de inundações, por exemplo. Sua construção e operação também levantam questões socioambientais importantes. Assim à medida que as planícies de inundação se

modificam por meio da influência humana vai surgindo a necessidade de melhor entender as interações hidrodinâmicas nessa conexão entre rio, planície e reservatório. Assim como Fleischmann et al. (2021) na bacia do rio Paraná, esta parte da pesquisa explora a influência do reservatório na atenuação de cheias, nos hidrogramas e nos picos de vazão.

A modelagem hidrodinâmica possibilita a comparação de hidrogramas nas áreas urbanas no que concerne a barragens e sua influência na dinâmica dos eventos. Alves (2017) destaca na bacia do rio Una, Serro Azul como a barragem mais importante para o sistema de controle de cheias, consecutivamente simulando qual seria sua influência para o evento de 2010 caso existisse na época. É observada então uma diminuição de 62% na vazão de pico imediatamente a montante da área urbana de Palmares quando da inserção do reservatório. No entanto, o autor alerta que, mesmo sendo significativa, essa redução não garante a completa resolução dos problemas nas cidades devido a extensa área de contribuição existente à jusante da barragem.

Tal questão é mais uma vez abordada por Alves et al. (2017) para o evento de 2017 no município de Palmares. É avaliada a influência da barragem de Serro Azul na retenção do volume e na redução das perdas provenientes da inundação registrada naquele ano. Com a barragem já construída e com dados hidrológicos disponíveis (Estação Palmares – 39560000), faz-se o caminho contrário. É simulada mancha para o evento de 2017 a partir da vazão máxima observada ( $818 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e a mancha para vazão máxima, estimada através da análise de séries históricas, caso a barragem não existisse ( $1170 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Foi então obtido amortecimento de 30% nos hidrogramas e concluído que a contribuição da barragem poderia ser ainda maior dependendo da distribuição de chuvas na bacia.

De modo semelhante, foi realizada comparação dos hidrogramas com e sem barragem, nesta pesquisa, para os eventos de projeto (Figuras 18 e 19). O amortecimento da vazão de pico com a inserção da barragem de Serro Azul, para os diferentes tempos de retorno, registrou mínimo de 45,4% e máximo de 55%, no modelo hidrológico (Tabela 10). E um mínimo de 43,5% e máximo de 54,6%, no modelo hidrodinâmico (Tabela 11). Observou-se que a porcentagem de amortecimento das vazões de pico cresceu de modo proporcional à magnitude dos eventos. Com as cheias de 5 anos de tempo de retorno apresentando as menores porcentagens de amortecimento e as de 200 anos, os maiores percentuais.

Tabela 10: Vazões máximas simuladas no HEC-HMS para Palmares

| Tempo de retorno (anos) | Vazões simuladas sem reservatório (m <sup>3</sup> /s) | Vazões simuladas com reservatório (m <sup>3</sup> /s) | Amortecimento da vazão de pico (%) |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 5                       | 563.4                                                 | 307.5                                                 | 45,4                               |
| 10                      | 704.8                                                 | 365.7                                                 | 48,1                               |
| 25                      | 938.3                                                 | 458.2                                                 | 51,2                               |
| 50                      | 1143.7                                                | 540.9                                                 | 52,7                               |
| 100                     | 1382.6                                                | 635.9                                                 | 54,0                               |
| 200                     | 1656.3                                                | 745.5                                                 | 55,0                               |

\*Medidas tomadas imediatamente a jusante da área urbana

Fonte: A autora (2020).

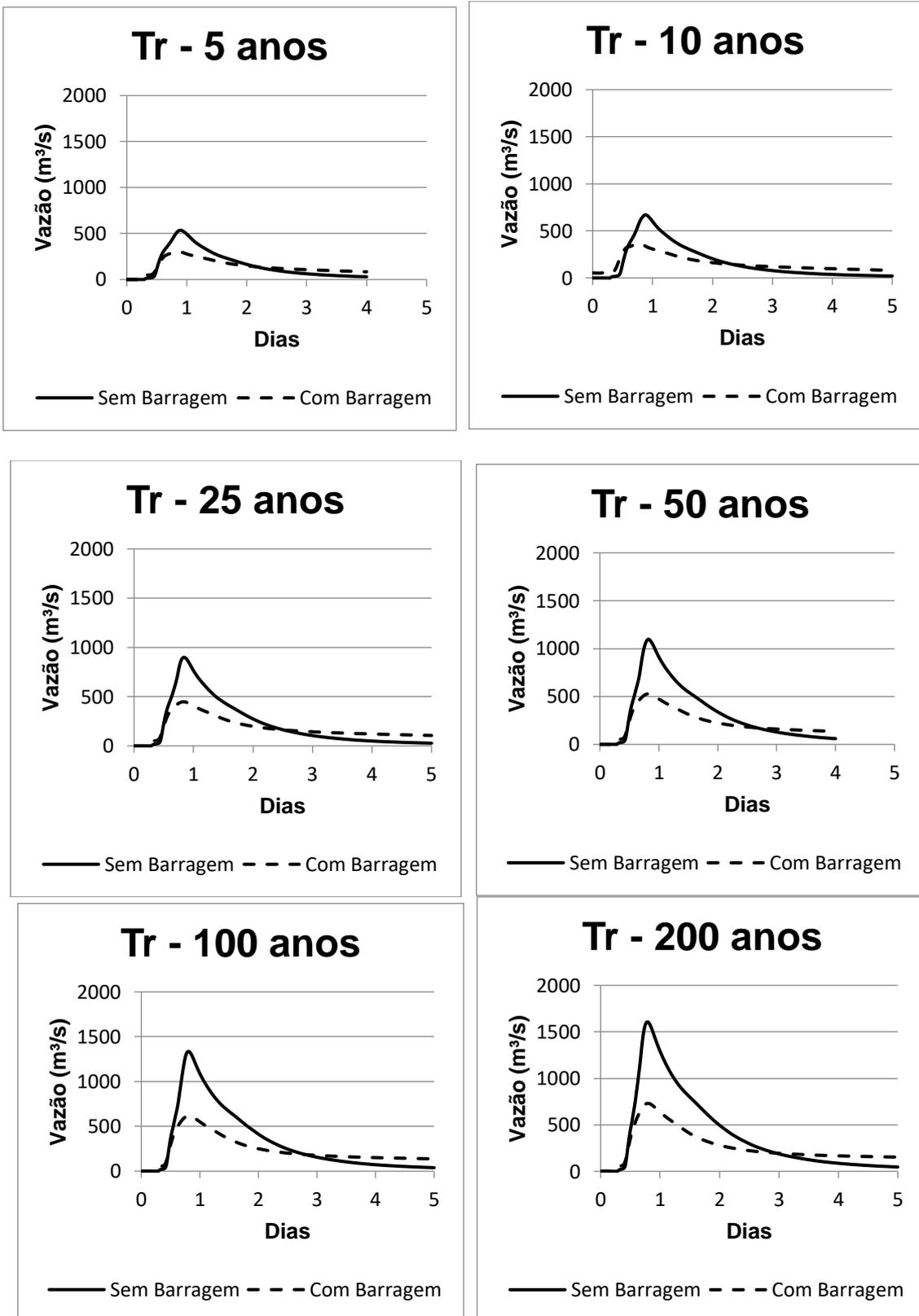
Tabela 11: Vazões máximas simuladas no HEC-RAS para Palmares

| Tempo de retorno (anos) | Vazões simuladas sem reservatório (m <sup>3</sup> /s) | Vazões simuladas com reservatório (m <sup>3</sup> /s) | Amortecimento da vazão de pico (%) |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 5                       | 535.32                                                | 302.34                                                | 43,5                               |
| 10                      | 670.48                                                | 358.72                                                | 46,5                               |
| 25                      | 898.26                                                | 447.93                                                | 50,1                               |
| 50                      | 1096.58                                               | 526.79                                                | 52,0                               |
| 100                     | 1335.05                                               | 618.54                                                | 53,7                               |
| 200                     | 1606.92                                               | 730.23                                                | 54,6                               |

\*Medidas tomadas imediatamente a jusante da área urbana

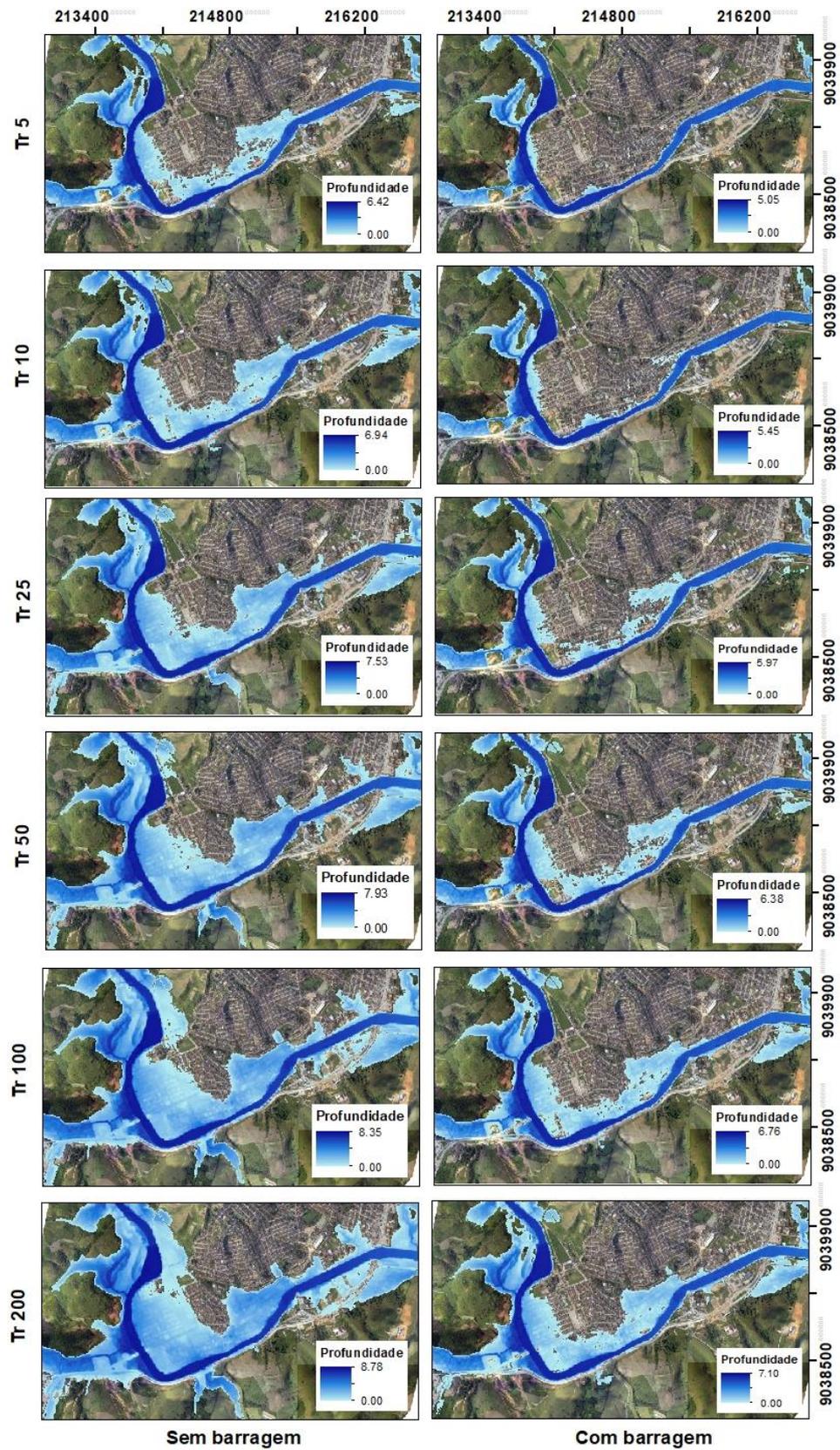
Fonte: A autora (2020).

Figura 17: Hidrogramas com e sem a barragem de Serro Azul simulados com o modelo HEC-RAS



Fonte: A autora (2020).

Figura 18: Manchas de inundação com e sem barragem simuladas com o modelo HEC-RAS



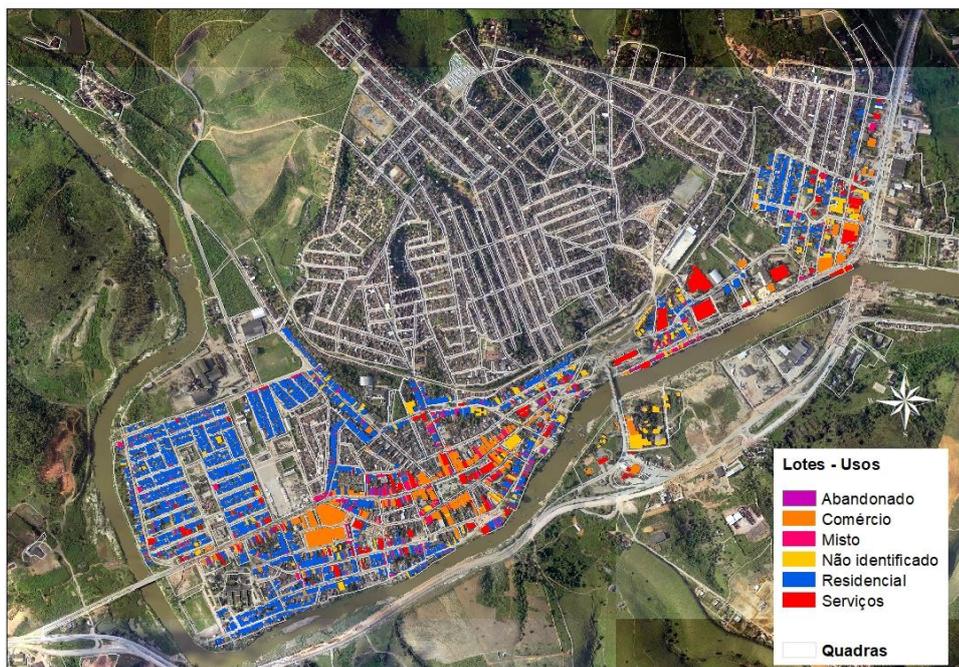
Fonte: A autora (2021).

## 4.2 CADASTRO

Tendo concretizada a etapa da modelagem 2D para os indicadores de perigo de inundação, o segundo passo para obtenção de curvas de dano e risco é realizar cadastramento dos itens expostos, neste caso as edificações residenciais. O cadastramento é a semente de um banco de dados que seja útil a análises de risco de inundação. A pesquisa focou em dados secundários armazenados em ambiente SIG de modo a possibilitar a fácil manipulação e a economia de recursos humanos e financeiros na obtenção dos dados.

Com uma boa cobertura do Google Street View, foram vetorizadas, em ambiente SIG, as quadras e as cobertas de edificações situadas dentro do perímetro da mancha de inundação desenvolvida por Dantas (2012) e validada pelo Corpo de Bombeiros estadual para o evento de 2010 na bacia do rio Una. O produto final contém 2733 construções, sendo 1852 residenciais, 247 comerciais, 185 de uso misto, 173 serviços, 86 abandonadas e 190 não identificadas (Figura 20). O uso das edificações, assim como o número de pavimentos e a quantidade de unidades em cada lote foram alguns dos vários atributos identificados pelo Google Street View.

Figura 19: Vetorização de lotes e quadras



Fonte: A autora (2021).

Para a cidade de Palmares, a diferença de tempo entre as imagens levantadas disponibilizadas pelo GSV (2012) e o cenário capturado in loco (2019) não apresentaram grandes diferenças, com as maiores sendo na majoritariamente a pintura da fachada (Figura 21). A paisagem urbana quase não sofreu modificações nesse intervalo de tempo, reforçando ainda mais a possibilidade do uso do Street View. Isso foi presente em toda a amostra, para casas dos diferentes padrões, com foco nas edificações de uso residencial, mais especificamente unifamiliares.

Figura 20: Google Street View x Fotos in loco





Fonte: A autora (2021).

No que concerne às edificações compreendidas como casas, é uma característica brasileira a possibilidade de mais de uma unidade residencial dentro de um mesmo lote. A identificação de casos assim foi possível pela observação de alguns itens como o quantitativo de contadores de luz, ou a existência de uma escada externa de acesso ao primeiro pavimento (Figura 22). A quantidade de pavimentos e unidades foi assim levada em consideração, num primeiro momento, pois se pensava interferirem na definição do padrão construtivo e consequentemente na estimativa final de danos. No entanto, a comparação de valores referentes aos danos com e sem a consideração das unidades residenciais revelou uma diferença de menos de 1%. Optou-se então por considerar a área de cobertura como variável para cálculo de danos na equação (16) proposta na metodologia.

Na classificação dos padrões construtivos, uma primeira categorização teve por base limiares extraídos da NBR 12721 e a área de cobertura obtida por imagem. Posteriormente, foram realizadas visitas de campo para validação dessa primeira classificação e coleta de um segundo elemento classificador de padrões, o programa arquitetônico (quais e quantos ambientes existentes na residência). Área construída e programa são dois dos elementos de maior destaque na diferenciação de cada padrão. A norma também utiliza itens de acabamento como louças e esquadrias. No entanto, estes últimos demonstraram menor relevância para a classificação, além de serem informações de difícil acesso.

Figura 21: Indicadores do número de unidades residenciais



Fonte: Fonte: A autora (2019).

\*baseada em imagens do Google Street View

A amostra obtida expôs toda a diversidade construtiva presente em campo, reafirmando a dificuldade já anteriormente encontrada para o enquadramento das edificações em um dos padrões. Resolveu-se então considerar ambas as classificações em dois conjuntos de limiares, combinando as informações provenientes dos questionários e da norma (Tabela 12). Na NBR, o valor de área é tabelado. Nos questionários, a classificação foi feita com base nos cômodos existentes em cada casa visitada, sendo posteriormente calculadas as áreas construídas médias de cada padrão. Um adendo importante referente às plantas arquitetônicas é que a quantidade de quartos e banheiros foram os dois elementos de maior destaque e influência na categorização dos padrões.

Tabela 12: Limiares de área para classificação de padrões construtivos

| <b>Padrão</b> | <b>Limiar 01 (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Limiar 02 (m<sup>2</sup>)</b> |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Popular       | 0 – 39.56                        | 0 – 64.95                        |
| Baixo         | 39.56 – 58.64                    | 64.95 – 72.02                    |
| Normal        | 58.64 – 92.21                    | 72.02 – 106.44                   |
| Alto          | 92.21 – 110.33                   | 106.44 – 224.82                  |

Fonte: A autora (2019).

A área é um elemento importante para a classificação por ser uma informação de fácil obtenção, principalmente através de sensoriamento remoto. Dentre todos os parâmetros presentes na construção do cadastro, e conseqüentemente no cálculo de danos, a área construída foi o que mais se destacou. O Google Street View por sua vez se mostrou uma ferramenta muito viável para a realização de análises deste tipo, principalmente no contexto de escassez de recursos financeiros, humanos e de dados.

Arrighi et al. (2020) reforçam essa ideia, destacando a área superficial das edificações afetadas como primeira métrica na análise de exposição, no caso de sua pesquisa, que também foi realizada em ambiente SIG, na escala do lote. O número de pavimentos é outro parâmetro citado. O Google Street View foi a ferramenta escolhida para levantamento de informações e preenchimento da tabela de atributos, mostrando-se também extremamente eficaz.

#### 4.3 ANÁLISE DE DANOS APLICADA À INUNDAÇÃO DE 2010

A investigação acerca de valores relacionados às conseqüências do evento de 2010 surge da busca por referências à estimativa de danos aqui realizada. Dados do Banco Mundial destacam que as perdas e danos referentes ao evento de 2010 somam R\$ 3.4 bilhões, o que corresponderia a 4% do PIB de Pernambuco, com destaque para o setor habitacional. 60% desse valor referente a custos diretos e os 40% restantes a custos indiretos. Aponta-se a concentração dos impactos nos setores sociais, com 90% dos danos estimados estando associados à população de baixa renda. Palmares e Barreiros somam quase 40% das perdas e danos municipalizados. Importante ressaltar a dificuldade em municipalizar as informações, visto que levantamento e anúncio de dados não era uniforme (BANCO MUNDIAL, 2012).

A principal linha de ação era a construção de residências para as famílias de baixa renda afetadas de acordo com a demanda estadual. Em Barreiros, Água Preta e Palmares, foi identificada a necessidade de 3786, 2137 e 1802 casas, respectivamente. O Anexo I do documento produzido pelo Banco Mundial traz alguns valores referentes ao setor habitacional. As unidades habitacionais populares danificadas, identificadas como maiores prejudicadas quando do desastre, teriam valor unitário de R\$ 10.250,00 (BANCO MUNDIAL, 2012).

Considerando que esta pesquisa identificou 1852 imóveis, classificando todos como unidades populares e utilizando apenas o valor acima citado, o dano total seria de R\$18.983.000. Consecutivamente, ao aplicar a equação do item 3.3.1 e os limiares definidos no item 4.2, utilizando os valores da época (Tabela 13), os danos encontrados totalizaram R\$ 15.292.572,56 para o primeiro limiar e R\$ 14.653.815,83 para o segundo. Assume-se coerência nos valores, uma vez que as grandezas em ambos os métodos estão próximas. Uma observação; os valores de CUB para Pernambuco na data do evento não estavam mais disponíveis no site do SINDUSCON-PE, então foram adotados valores de região próxima e com características construtivas semelhantes.

Tabela 13: Custo Unitário Básico – PB – Jun 2010

| <b>Classe</b> | <b>(R\$/m<sup>2</sup>)</b> | <b>Classe</b> | <b>(R\$/m<sup>2</sup>)</b> |
|---------------|----------------------------|---------------|----------------------------|
| R1-B          | 687,08                     | R1-A          | 1031,38                    |
| R1-N          | 814,47                     | RP1Q          | 699,37                     |

Fonte: CUSTO (2010).

#### 4.4 ANÁLISE DE DANOS E CURVAS

Como abordado anteriormente, o risco de inundação sob a ótica da engenharia deve abranger a magnitude do evento, e suas consequências. Assim, a análise de medidas de controle de inundação, principalmente estruturais, deve considerar toda a distribuição da probabilidade das inundações evitando que o custo-benefício seja erroneamente calculado maior do que realmente é. Os custos devem ser baseados na avaliação de risco (FADEL et al., 2018b).

Com a probabilidade e o dano respectivo a cada evento, é possível traçar o perfil de risco em uma curva dano-probabilidade. O dano bruto é o ponto na curva dano-probabilidade para cada tempo de retorno e o dano esperado é a integral da curva, também chamada de curva de risco. O perfil do risco é a informação mais relevante no design de medidas de prevenção e o dano esperado é o dado mais confiável na representação do padrão de danos de cada região (FADEL et al., 2018b).

No que diz respeito ao reservatório de Serro Azul, a redução de danos é bastante significativa após sua implantação, para ambos os limiares, principalmente no que diz respeito à estrutura das residências. No limiar 01, os danos econômicos

sofridos pelas edificações residenciais, no cenário com barragem, caracterizam redução de 91%, 94%, 89% e 81% se comparado com o cenário sem barragem, para os eventos de 5, 10, 25 e 50 anos de tempo de retorno. Já as inundações de 100 e 200 anos, apresentam percentuais menores de abatimento, mas ainda assim expressivos 71% e 60%, respectivamente. Para o limiar 02 o comportamento foi praticamente igual, com diminuição de 91%, 94%, 89%, 82%, 71% e 60% para os eventos de 5, 10, 25, 50, 100 e 200 anos, nessa ordem.

Para os danos a conteúdo, os valores da redução são maiores para os eventos de maior frequência e menores para os cenários mais raros. A redução é de 87%, 79%, 58%, 45%, 38% e 34% para o limiar 01, e 86%, 79%, 58%, 45%, 37% e 34% para o limiar 02, respectivamente aos eventos de 5, 10, 25, 50, 100 e 200. As Tabelas 14 e 15 detalham os demais valores.

Tabela 14: Estimativa de danos à estrutura residências

| Tempo de retorno (anos) | Limiar 01 (R\$) |               | Limiar 02 (R\$) |               |
|-------------------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
|                         | Sem Barragem    | Com Barragem  | Sem Barragem    | Com Barragem  |
| 5                       | 3.792.011,98    | 354.954,69    | 3.550.334,69    | 337.017,98    |
| 10                      | 8.848.708,64    | 558.847,12    | 8.404.224,08    | 531.467,39    |
| 25                      | 15.563.438,55   | 1.731.554,14  | 14.724.334,53   | 1.619.393,71  |
| 50                      | 18.980.767,52   | 3.546.706,46  | 17.934.046,54   | 3.314.532,49  |
| 100                     | 23.239.583,90   | 6.733.074,43  | 22.008.936,36   | 6.355.953,75  |
| 200                     | 27.167.627,22   | 10.835.456,37 | 25.839.990,48   | 10.283.328,33 |

Fonte: A autora (2020).

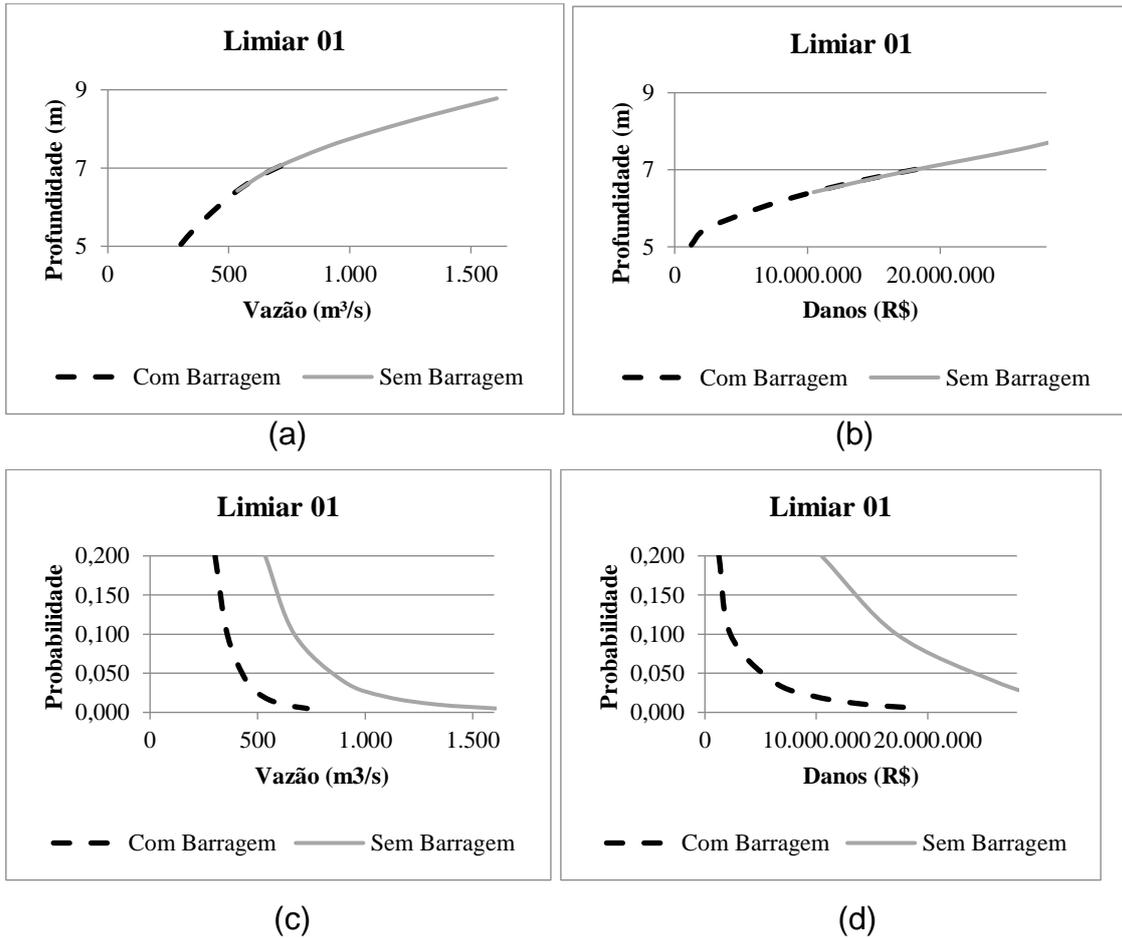
Tabela 15: Estimativa de danos ao conteúdo das residências

| Tempo de retorno (anos) | Limiar 01 (R\$) |              | Limiar 02 (R\$) |              |
|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
|                         | Sem Barragem    | Com Barragem | Sem Barragem    | Com Barragem |
| 5                       | 6.673.757,28    | 898.832,91   | 6.630.483,20    | 908.508,56   |
| 10                      | 8.345.234,00    | 1.722.427,34 | 8.255.220,99    | 1.715.892,02 |
| 25                      | 10.400.683,35   | 4.347.220,22 | 10.269.035,85   | 4.335.922,31 |
| 50                      | 11.690.746,20   | 6.409.388,70 | 11.541.387,13   | 6.373.232,90 |
| 100                     | 12.534.539,00   | 7.808.382,08 | 12.367.391,26   | 7.731.819,95 |
| 200                     | 13.297.714,26   | 8.722.283,89 | 13.138.446,50   | 8.621.479,86 |

Fonte: A autora (2020).

As curvas da Figura 23a relacionam valores de profundidade e vazão de uma determinada seção do rio, cruzando informações obtidas através dos modelos. As curvas da Figura 23b são representam o conjunto de danos, com os pontos calculados em função da profundidade através das equações de danos. As curvas da Figura 23c resultam de análises de frequência dos eventos estudados, associando cada valor de vazão com sua respectiva probabilidade de excedência. E as curvas da Figura 23d são obtidas de todos os valores calculados anteriormente, aqui repetem-se os mesmos fatores de probabilidade das vazões, só que agora em associação aos danos. Todas as curvas são resultado de gráficos de dispersão. Essa mesma lógica é aplicada para a Figura 24, respectivamente.

Figura 22: Curvas para o conjunto de limiares 01

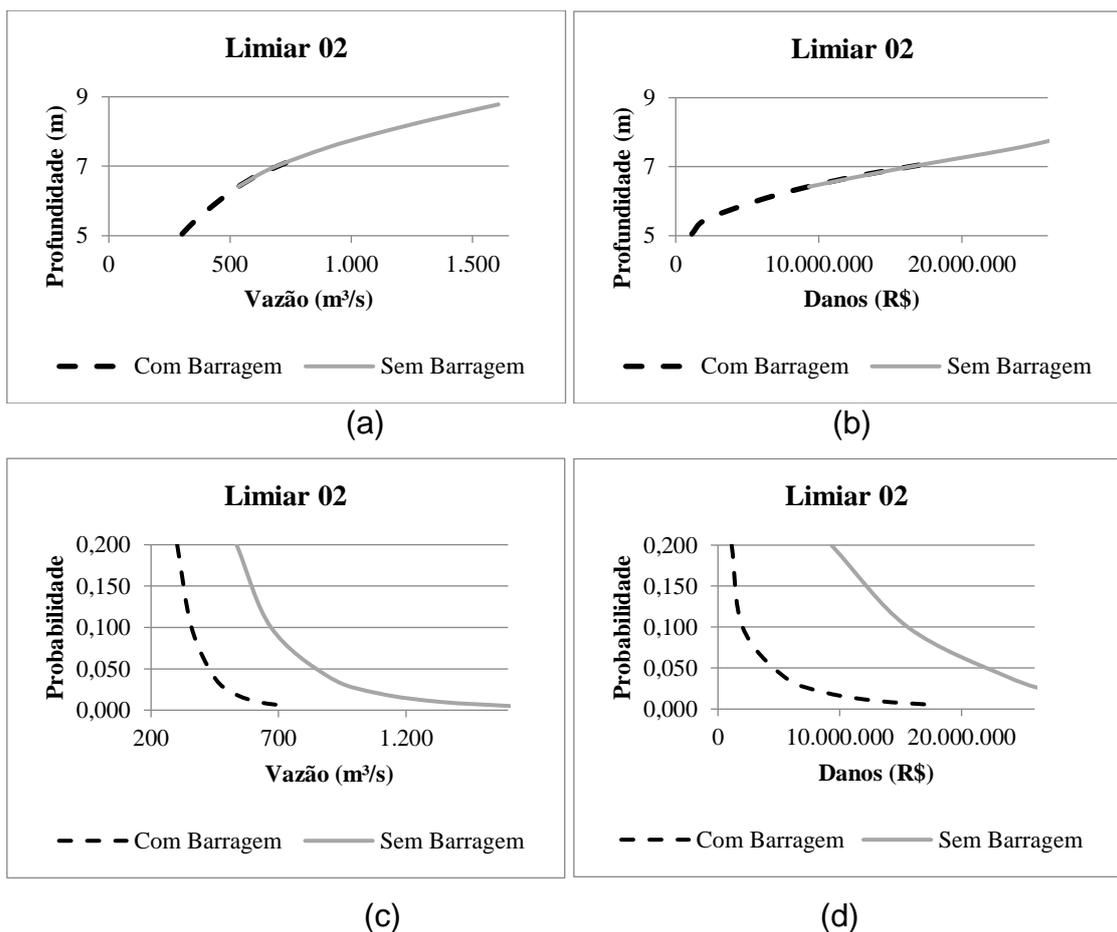


Fonte: A autora (2021).

Assim como em Tincu et al. (2020), a exposição foi avaliada para cada tempo de retorno através da sobreposição das manchas e análise das profundidades. A relação entre as magnitudes dos eventos e suas respectivas consequências foi satisfatoriamente desenvolvida e apresentada. A quantificação do risco concretizou-se na forma das curvas geradas. E além da curva de risco, o dano médio anual, ou risco total anual, foi devidamente representado pela integral da área abaixo da mesma (SHRESTHA & KAWASAKI, 2020).

Nos gráficos, a linha contínua representa o cenário anterior à construção da barragem de Serro Azul, enquanto a linha tracejada corresponde ao cenário com inserção da estrutura. Antes da barragem, os valores da profundidade da água calculados variaram de 6.42 a 8.78 m, e os da vazão de 535 a 1606 m³/s. Já após a instalação da estrutura, as profundidades baixaram, passando a variar entre 5.05 e 7.10 m, com vazões de 302 a 730 m³/s. Valores para ambos os limiares.

Figura 23: Curvas para o conjunto de limiares 02



Fonte: A autora (2021).

Em Fadel et al. (2018b) foram realizadas simulações 1D com o modelo HEC-RAS para cálculo de danos esperados e custo-benefício na implantação de medidas de proteção contra inundações. A cada mancha simulada foram associados prejuízos potenciais, com danos obtidos de base de dados dos municípios em estudo. É simulado cenário sem medidas aplicadas, outro com zoneamento do solo e ainda outro com inserção de um dique. Deixa-se aqui registrado que no caso de comparação da efetividade entre diferentes medidas de enfrentamento à inundação se faz necessária outra abordagem. Esta última é demonstrada pelos autores no artigo em questão.

Fadel et al. (2018b) discutem como a aparente não ação é a medida menos custosa no curtíssimo prazo, visto que intervenções quaisquer sempre terão um custo inicial e benefícios proporcionados apenas posteriormente. Os autores explicam que no médio e longo prazo, outros eventos de inundação provavelmente

acontecerão, e o custo dos danos acumulados aumentará, facilmente superando um cenário em que nenhuma medida é implantada.

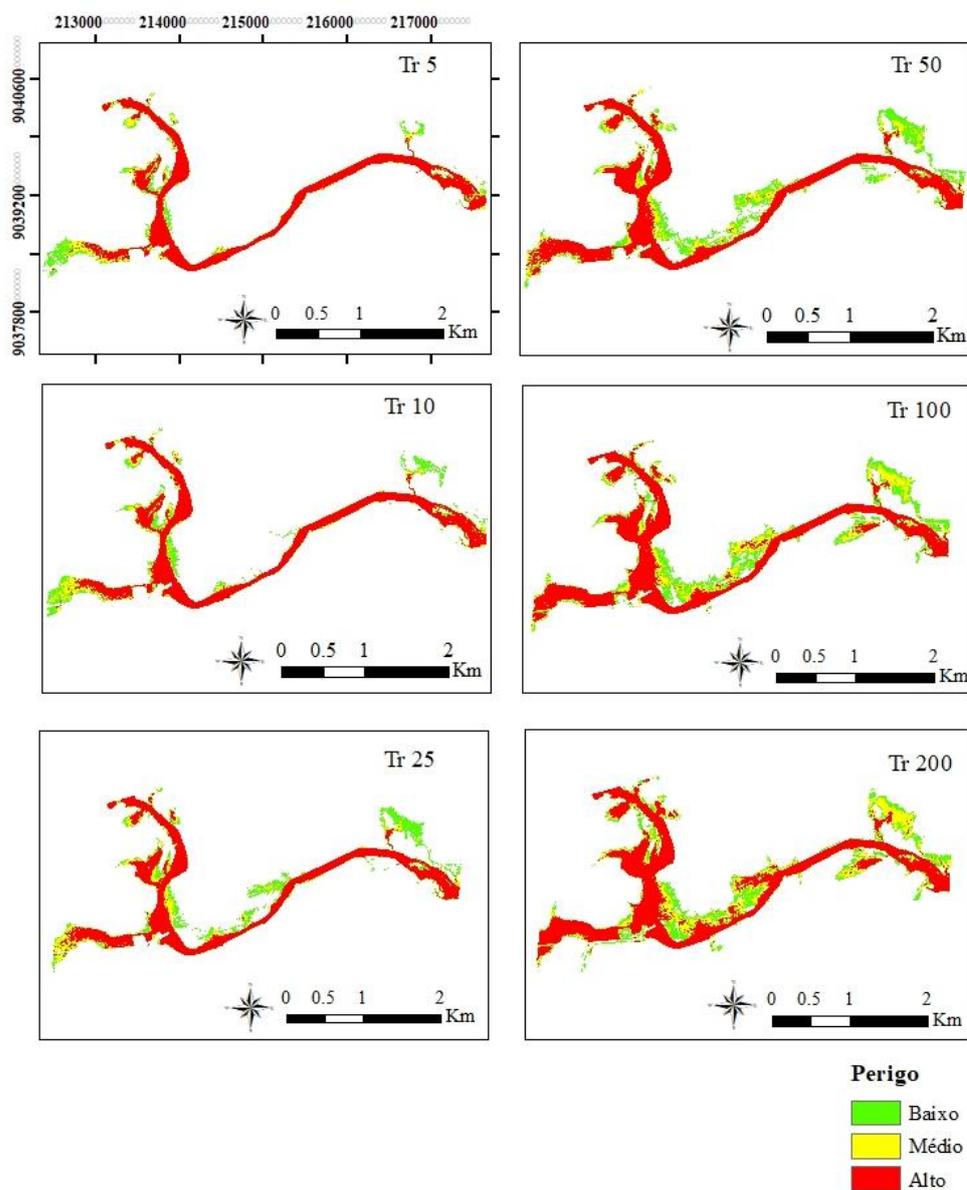
Além de ter sido projetada para proteger as cidades a jusante de eventos de inundação, com o fim das obras de sua adutora, a barragem de Serro Azul terá uso ampliado, atuando no abastecimento de municípios do Agreste pernambucano. Em Palmares, a combinação com outras medidas, como a remoção de várias construções localizadas nas margens do rio se somam aumentando os benefícios causados e justificando sua implantação. A combinação entre medidas estruturais e não estruturais é o cenário mais propício à gestão de riscos na literatura científica acerca deste tema.

Os benefícios anuais proporcionados pela barragem de Serro Azul, através da metodologia desta pesquisa, são estimados em 3,5 milhões de reais ao ano para o setor residencial, sem contar eventos isolados prováveis de acontecerem nesse período. Lembrando que esse número se refere apenas ao setor residencial de Palmares. Ao considerar demais municípios à jusante da barragem, assim como outros setores (serviço e comércio), a tendência é que este número aumente.

#### 4.5 MAPAS DOS ELEMENTOS DO RISCO

Um dos primeiros passos na análise de risco de inundação é a modelagem do fenômeno natural que no quadro conceitual está associado ao perigo. Os indicadores de perigo então obtidos são reclassificados de modo a comunicarem melhor seu comportamento, além de possibilitarem comparações com outros estudos. Nesta pesquisa, o indicador profundidade, protagonista da análise de danos, é representado para os cenários com barragem visto que a mesma encontra-se em funcionamento na bacia. A área de maior perigo concentra-se majoritariamente no canal e suas proximidades imediatas em todos os cenários simulados (Figura 25). Os limiares base para o indicador profundidade são apresentados no item 3.2. Definem-se três classes: perigo baixo (0-0,60 m), médio (0,60-1,20 m) e alto (>1,20 m).

Figura 24: Mapas de perigo (com barragem)

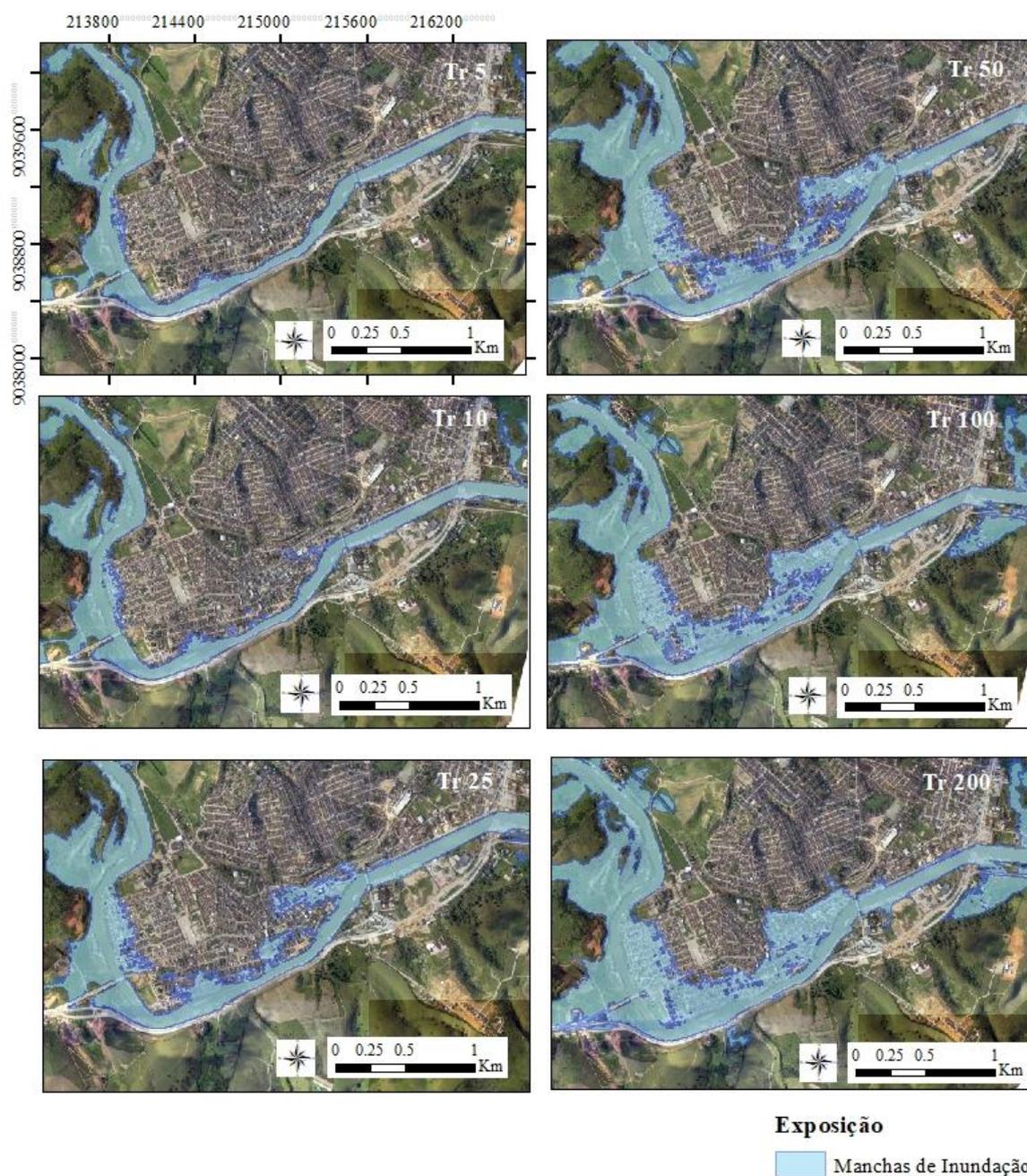


Fonte: A autora (2021).

Assim como em Andrade & Szlafsztein (2018), a exposição é aqui tratada enquanto a extensão das inundações, identificada pelos elementos que se encontram dentro da área de atuação dos eventos (Figura 26). Nesta pesquisa, o foco manteve-se nas residências para que fosse realizada a análise de danos, mas a contabilidade das construções com outros usos também foi feita, através principalmente de dados secundários. Avaliou-se a exposição das edificações para cada tempo de retorno através da sobreposição das manchas e análise das profundidades como em Tincu et al. (2020). A área da mancha varia progressivamente de 1.2 km<sup>2</sup> para o evento de 5 anos de tempo de retorno até

aproximadamente 2,6 km<sup>2</sup> no evento de 200 anos. Foram identificadas 210 construções expostas para o evento de 5 anos. Para os eventos de 10, 25, 50, 100 e 200 anos, foram contabilizadas 343, 758, 1080, 1286 e 1431 construções expostas, respectivamente.

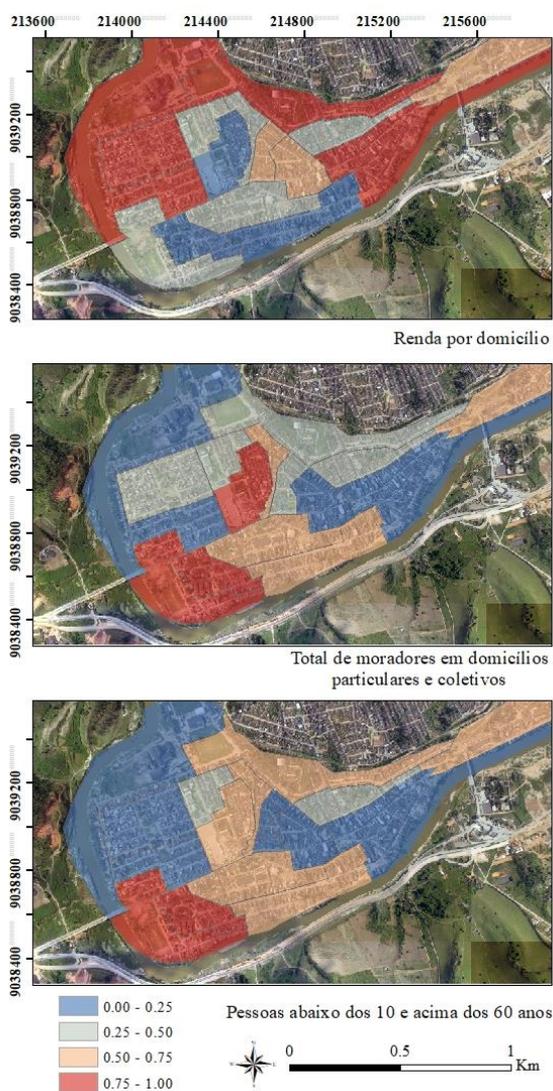
Figura 25: Mapas de exposição



Fonte: A autora (2021).

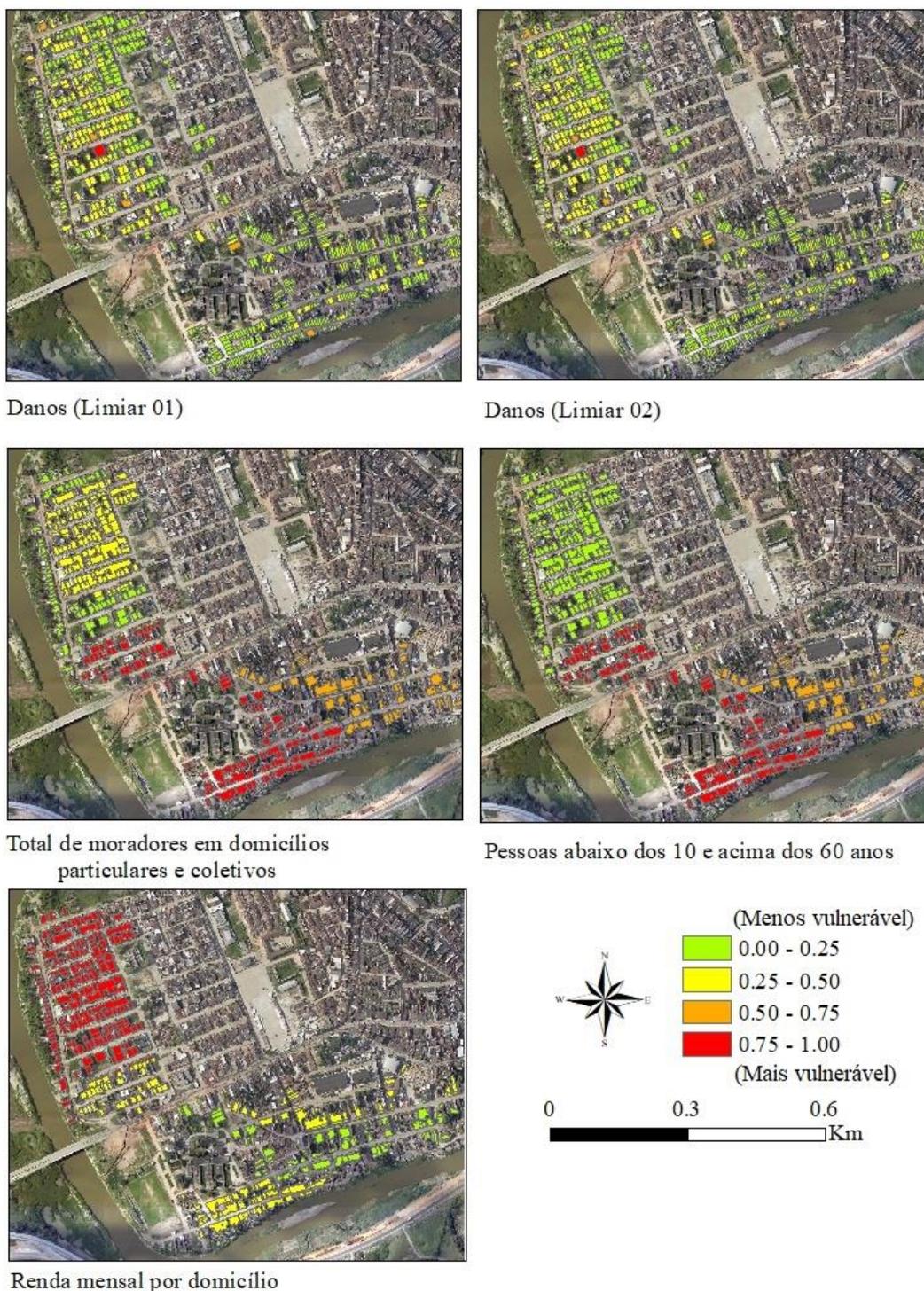
Para a engenharia, a vulnerabilidade pode estar associada aos danos produzidos por um evento específico (ALBANO et al., 2017). Apresenta-se aqui o comportamento dos indicadores de vulnerabilidade para um evento de 200 anos de tempo de retorno, considerando a existência do reservatório de Serro Azul. A incorporação de dados sociais obtidos do Censo Demográfico já é uma prática de sucesso que pode se expandir cada vez mais. Os setores censitários do IBGE foram traduzidos com sucesso para os lotes vetorizados em ambiente SIG. As equações 19 e 20 foram aplicadas para a normalização dos diferentes dados. A diferença de ambas está na escala, a Figura 27 apresenta os indicadores na escala do setor censitário enquanto na Figura 28 os mesmos indicadores encontram-se na escala do lote.

Figura 26: Indicadores de Vulnerabilidade (Setores Censitários)



Fonte: A autora (2021).

Figura 27: Indicadores de Vulnerabilidade (Lotes)



Fonte: A autora (2021).

No que concerne aos danos, existe uma aparente uniformidade ao longo de toda a região, já com relação aos fatores sociais e demográficos, nota-se a distinção existente entre as áreas, quase que definindo dois setores bem distintos, um mais ao sul e outro a leste, ambos às margens do rio (Figura 28). Como bem destacam Aroca-Jiménez et al. (2020), a identificação de padrões espaciais de vulnerabilidade dentro da área de estudo pode favorecer a gestão, possibilitando o desenvolvimento de estratégias específicas para cada zona urbana, assim como políticas públicas, ações de resposta, dentre outros. Assim como no estudo de Andrade & Szlafsztein (2018), a metodologia proposta foi eficaz na exibição espacial dos resultados em escala local. Esta última, sendo a mínima necessária para que a gestão de risco possa desenvolver estratégias de ação e políticas públicas.

De modo quantitativo, na engenharia, o risco é interpretado pelo estudo de eventos com diferentes magnitudes e seus respectivos danos. A seguir são apresentados de modo espacialmente distribuído os valores formadores das curvas probabilidade-danoconstruídas para os dois conjuntos de limiares adotados (Figuras 29 e 30). Esses resultados ampliam o escopo de Machado et al. (2005) uma vez que se vai além da curva para a obtenção dos resultados espacializados em mapas.

Escolheu-se normalizar os dados, mas é possível atingir o nível de precisão de Sousa & Goerl (2018) e Fadel et al. (2018a), convertendo os índices de volta aos valores absolutos de dano em reais. A consideração conjunta dos elementos apresentados nas Figuras 28, 29 e 30 buscam portanto contribuir para a promoção do cenário mais desejável que é aquele no qual ações são implementadas antes, durante e depois do desastre. Ações preventivas de precaução antes, ações emergenciais durante, e ações de reconstrução depois (ANDRADE & SZLAFSZTEIN,2018).

Figura 28: Mapas de risco (limiar 01)



Fonte: A autora (2021).

Figura 29: Mapas de risco (limiar 02)



Fonte: A autora (2021).

Por fim, quanto ao desempenho das análises de risco, é ainda importante destacar que incertezas são inerentes e apresentam níveis significativos ao longo do processo. Muitas são suas fontes, seja em dados topográficos, características do fluxo, ou em parâmetros do próprio modelo, por exemplo. Ter ciência dessa limitação é de extrema importância para tomadores de decisão quando do desenvolvimento de políticas públicas. Grande esforço para a diminuição de

incertezas encontra-se na validação da modelagem, tanto do fenômeno quanto dos danos. Técnicas de validação incluem comparação entre resultados simulados pelo modelo e dados observados, comparação entre o desempenho de diferentes modelos, e análise de resultados por parte de especialistas da área. No entanto, reafirma-se que a validação ainda enfrenta diversos desafios como a escassez, não padronização, ou não disponibilidade de dados em quantidade e qualidade suficientes. Assim, muitas vezes se tem a transferência de modelos de danos de uma região a outra sem qualquer adaptação, o que não é recomendável. A introdução de dados específicos locais, por sua vez, contribui para a diminuição dessas incertezas. A esperança é que multiplicação de estudos no tema possa ajudar a criar uma base de dados para comparação e validação de resultados (MOLINARI et al., 2019).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A modelagem explorou o elemento perigo por diferentes eventos de projeto. A calibração do modelo hidrológico foi realizada com valores de referência para a bacia em estudo, com foco na área urbana do município em questão. A superestimação das vazões demonstrou a impossibilidade de uniformidade da dinâmica das chuvas perante o tamanho da bacia, mas diferentes recursos utilizados e a manipulação do modelo possibilitaram ajuste. Já o modelo hidrodinâmico apresentou novas possibilidades através das simulações 2D, com testes de sensibilidade realizados para percepção dos parâmetros do modelo na versão mais nova do software.

O cadastro dos elementos expostos foi feito de modo satisfatório na escala do lote em ambiente SIG, com uso do Google Street View e imagens de satélite de alta resolução. A classificação das edificações foi concluída com sucesso, tendo a área de coberta se provado o parâmetro principal na aplicação desta metodologia. A parte operacional foi devidamente facilitada contribuindo para a compreensão de toda a diversidade construtiva presente in loco, fator que imprimia certa dificuldade à classificação dos padrões, etapa essencial na análise de danos.

A contribuição da barragem de Serro Azul mostrou-se significativa e evidente na redução dos valores absolutos dos danos residenciais. Os danos estimados foram diminuídos em mais de 50% em todos os cenários, chegando a mais de 90% para eventos de maior frequência. Os valores das estimativas de danos para o setor residencial variaram em torno de 10 a 40 milhões de reais. Sendo esses valores referentes aos cenários sem barragem. Com a inserção de Serro Azul, a estimativa de danos é então reduzida e passa a registrar aproximadamente de 1 a 19 milhões de reais, em ambos os limiares.

Por sua vez, os benefícios anuais proporcionados pela barragem de Serro Azul, através da metodologia desta pesquisa, são estimados em 3,5 milhões de reais ao ano para o setor residencial, sem contar eventos isolados prováveis de acontecerem nesse período. Lembrando que esse número se refere apenas ao setor residencial do município em questão. Ao considerar demais municípios à jusante da barragem, assim como outros setores (serviço e comércio), a tendência é que este número aumente proporcionalmente.

Os mapas apresentados traduzem graficamente os valores obtidos com os indicadores de perigo sendo reclassificados em categorias facilmente reconhecíveis. A exposição foi caracterizada pela identificação dos elementos passíveis de serem atingidos quando da ocorrência dos diferentes eventos. E a vulnerabilidade, ao incorporar dados censitários, conseguiu identificar melhor a morfologia social da área de estudo. Assim, a metodologia montada e executada nesta pesquisa proporcionou a realização da análise de risco e obtenção das curvas para o município de Palmares.

O entendimento do risco se estabelece e se fortalece através de informação de qualidade, metodologias de análise acessíveis, espacialização dos dados, suporte às decisões e o estabelecimento da comunicação entre os diferentes atores participantes. O Brasil, com seu território continental, já foi cenário de diversos eventos desastrosos relacionados a inundações. A busca por combinar metodologias e criar mapas de risco mais robustos para a realidade local visa contribuir com a redução de custos e danos gerados ao setor público, privado e principalmente à população.

Importante destacar a possibilidade de aplicação dos métodos utilizados nesta pesquisa em outras regiões e cidades do Brasil, uma vez que a quase totalidade de dados pode ser obtida de forma secundária. A maior restrição pode ainda ser os dados necessários para a representação da topografia na simulação hidrodinâmica devido a não disponibilidade de MDT de alta resolução de forma abrangente.

Um pequeno adendo; em seus passos iniciais a pesquisa buscou desenvolver metodologia para validação de modelos hidrodinâmicos através de imagens de radar de abertura sintética, utilizando produtos dos satélites europeus Envisat e Sentinel-1A. Devido ao comprimento de onda emitido, o sinal de tais sensores pode penetrar com maior facilidade a cobertura de nuvens e por sua independência da reflexão da luz solar podem operar de dia ou de noite. Uma das vantagens desse sistema é a acessibilidade aos produtos, os quais são disponibilizados sem custo, ou através do envio de um projeto de pesquisa quando da necessidade de uma quantidade maior de dados. Na época, a metodologia provou-se insuficiente para a caracterização especificamente do evento de 2010. Atualmente, no entanto, acredita-se que tais dificuldades já tenham sido superadas. Esses sistemas ativos de micro-ondas são

de grande relevância para imageamentos tropicais, cujas intensas condições de nebulosidade podem interferir na aquisição de dados. Deixa-se aqui registrado.

- **Recomendação 1: Automatização de processos (I.A. para classificação de uso das edificações)**

Inicialmente achava-se que a automatização do processo seria possível na classificação dos padrões construtivos com base nas fachadas, o que não se comprovou no decorrer da pesquisa. No entanto, a classificação de uso das edificações é uma etapa anterior à definição dos padrões e pode ser sim realizada de maneira automática. Para tanto, recomenda-se o uso de tecnologias de Machine Learning, Computer Vision e redes neurais, dentre outras, para o desenvolvimento esta etapa, economizando tempo. A aplicação de Inteligência Artificial ao Google Street View é de grande valia para estudos referentes a inundações, mas também para demais estudos urbanísticos em geral. O machine learning vem contribuir para caracterização dos municípios, e produtos que podem ser usados para os mais diversos propósitos no âmbito principalmente da gestão. Essa é uma alternativa que exige pouco recurso financeiro e humano. Exemplos já existentes podem ser encontrados em Zhang et al., 2017a e Zhang et al., 2017b.

- **Recomendação 2: A importância da adaptação**

Adaptação é um conceito da maior importância no que diz respeito ao tema desastres. Estruturas tradicionais pensadas sem considerar questões como flexibilidade e adaptabilidade a condições futuras, assim como políticas desenvolvidas com foco apenas no melhor cenário possível podem resultar em sistemas com baixo desempenho. Diante disso, estratégias que possibilitem mudanças acabam sendo responsáveis pela produção das melhores iniciativas e ações (BUURMAN & BABOVIC, 2016). É possível entender esse movimento ao ver que barragens, inicialmente construídas com o único propósito de abastecimento, passaram a ser operadas também para controle de inundação, por exemplo. Essa é uma área que ainda possibilita bastante exploração do ponto de vista científico e que promete uma demanda cada vez maior diante da realidade climática atual.

- **Recomendação 3: Incertezas**

A diminuição de incertezas passa pela existência de mais trabalhos na temática aqui desenvolvida. Pensando para além dos dados observados, de modo que possam ser feitas comparações no que concerne ao desempenho das curvas de

risco. Muito embora este seja um tema atual, não é um tema novo, e mesmo assim ainda apresenta muitas lacunas e poucos trabalhos buscando de fato chegar ao final da análise de risco. Iniciativas colaborativas têm ganhado cada vez mais destaque nesse tema com conceitos como mapeamento colaborativo, crowdsourcing, informações geográficas voluntárias e ciência cidadã. Um exemplo é o aplicativo Hidromapp, ferramenta de suporte técnico que permite coleta de dados georeferenciados sobre inundações. O Hidromapp é um sistema leve, fácil de usar, com baixo consumo de energia e de dados móveis. Seu uso é recomendado especialmente em locais de risco, contribuindo para calibração de modelos hidráulicos e consequentemente para redução de incertezas. O aplicativo é grátis e está disponível para Android na Google Play Store (OLIVEIRA et al., 2018; RIBEIRO et al., 2020).

## REFERÊNCIAS

- ABDULKAREEM, M.; ELKADI, H. From engineering to evolutionary, an overarching approach in identifying the resilience of urban design to flood. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.28, p.176-190, 2018.
- ABEBE, Y.; KABIR, G.; TESHAMARIAM, S. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model. **Journal of Cleaner Production**, v.174, p.1629-1641, 2018.
- ABEP - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE PESQUISA. **Critério de classificação econômica Brasil**. 2019. Disponível em: <http://www.abep.org> Acesso em: 13 de Janeiro de 2020.
- ABIPEME – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PESQUISAS DE MERCADO. **Critério Brasil**: Instrumento para definir a classe social da população. Disponível em: <http://www.abipeme.org.br> Acesso em: 12 de Julho de 2015.
- ALBANO, R.; MANCUSI, L.; ABBATE, A. Improving flood risk analysis for effectively supporting the implementation of flood risk management plans: The case study of “Serio” Valley. **Environmental Science and Policy**, v.75, p.158-172, 2017.
- ALCÂNTARA, L. R. P. **Espacialização dos parâmetros das equações de intensidade – duração e frequência para municípios da Mata Sul do Estado de Pernambuco**. 2018. 61f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2018.
- ALMEIDA, L. V. Q.; ELEUTÉRIO, J. C. Estado da arte de curvas de danos potenciais de inundações para o setor habitacional. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 23, 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.
- ALVES, F. H. B. A.; CIRILO, J. A.; ASFORA, M. C.; MELO, C. R. Comparativo das precipitações dos eventos extremos de 2010 e 2017 ocorridos na bacia do rio Una em Pernambuco e estimativa dos efeitos de barragem de contenção de cheias. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 22, 2017, Florianópolis. Anais... Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.
- ALVES, F. H. B. A. **Sistema de previsão de enchentes**: Integração de modelos de previsão de chuva, simulação hidrológica e hidrodinâmica. 2017. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.
- ANDRADE, M. M. N.; SZLAFSZTEIN, C. F. Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: Na Amazon case study of flooding and flash flooding. **Science of the Total Environment**, v.630, p.903-912, 2018.

ANDRÉS, N. P. **Hydrograph estimation for different return periods in Una basin**. 2019. 12f. Relatório de estágio (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

ANUÁRIO brasileiro de desastres naturais: 2013 / Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Brasília: CENAD, 2014. 106p.

APAC. **Bacias hidrográficas**. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/> Acesso em: 24 de maio de 2018.

AROCA-JIMÉNEZ, E.; BODOQUE, J. M.; GARCÍA, J. A. How to construct and validate an Integrated Socio-Economic Vulnerability Index: Implementation at regional scale in urban areas prone to flash flooding. **Science of the Total Environment**, v.746, p.140905, 2020.

ARRIGHI, C.; MAZZANTI, B.; PISTONE, F.; CASTELLI, F. Empirical flash flood vulnerability functions for residential buildings. **SN Applied Sciences**, v.2, p.904, 2020.

BALICA, S.; WRIGHT, N. G. Reducing the complexity of the flood vulnerability index. **Environmental Hazards**, v.9, n.4, p.321-339, 2010.

BANCO MUNDIAL. **Avaliação de perdas e danos: Inundações bruscas em Pernambuco** – Junho de 2010. Brasília: Banco Mundial, 2012. 75 p.

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**. 1. reimp. da 2. ed. rev. ampl. – Porto Alegre: ABRH, 2011. 628 p.

BARÓ-SUÁREZ, J. E.; DÍAZ-DELGADO, C.; ESTELLER-ALBERICH, M. V. Curvas de daños económicos provocados por inundaciones em zonas habitacionales y agrícolas de México. Parte I: propuesta metodológica. **Ingeniería hidráulica em México**, v. 22, n.1, p. 91-102, 2007.

BARQUET, K.; CUMISKEY, L. Using participatory Multi-Criteria Assessments for assessing disaster risk reduction measures. **Coastal Engineering**, v.134, p.93-102, 2018.

BARRENECHEA, J.; GENTILE, E.; GONZÁLEZ, S.; NATENZON, C. Una propuesta metodológica para el estudio de La vulnerabilidad social em el marco de la teoria social del riesgo. In: **Jornadas de Sociologia**, 4, 2000, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: Facultad Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires, 2000.

BATHRELLOS, G. D.; SKILODIMOU, H. D.; CHOUSIANITIS, K.; YOUSSEF, A. M.; PRADHAN, B. Suitability estimation for urban development using multi-hazard assessment map. **Science of the Total Environment**, v.575, p.119-134, 2017.

BATISTA, L. F. D. R. **Estudo de indicadores de risco de inundação no município do Cabo de Santo Agostinho**. 2015. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

BATISTA, L. F. D. R.; RIBEIRO NETO, A.; COUTINHO, R. Q. Flood damage analysis: A Brazilian case study. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.4, n.1, p.150-160, 2020.

BATISTA, L. F. D. R.; RIBEIRO NETO, A. Hydrological modeling to calculate design hydrographs – Una river Northeast Brazil. In: **Encontro Nacional de Desastres**, 2, 2020. Porto Alegre: ABRH, 2020.

BATISTA, L. F. D. R.; RIBEIRO NETO, A.; MONTENEGRO, S. M. G. L. M. Adaptation mechanisms for extreme events in the Capibaribe River Basin, Brazil. In: **World Water Congress**, 14, 2017, Cancun. Anais... France: IWRA, 2017.

BEMFICA, D. C.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. Análise da aplicabilidade de padrões de chuva de projeto a Porto Alegre. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.4, 2000.

BROWN, P.; DAIGNEAULT, A. J.; TJERNSTRÖM, E.; ZOU, W. Natural disasters, social protection, and risk perceptions. **World Development**, v.104, p.310-325, 2018.

BRUNNER, G. W. **HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2016. 547p.

BRUNNER, G. W.; CEIWR-HEC. **HEC-RAS, River Analysis System User's Manual Version 5.0**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2016. 962p.

BUURMAN, J.; BABOVIC, V. Adaptation pathways and real options analysis: An approach to deep uncertainty in climate change adaptation policies. **Policy and Society**, v.35, p.137-150, 2016.

CAMMERER, H.; THIEKEN, A. H.; LAMMEL, J. Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.13, p.3063-3081, 2013.

CEIWR-HEC. **HEC-FDA Flood Damage Reduction Analysis Version 1.4.1**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2016. 392p.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H.B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. 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: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

CIRILO, J. A.; ALVES, F. H.B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. A. L. Suporte de informações georreferenciadas para planejamento de recursos hídricos – Programa

Pernambuco Tridimensional. In: **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 12, 2014, Natal. Anais... Natal: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2014.

CONDEPE/FIDEM. **Rio Una, GL 4 e GL 5**. Recife: 2006. 85p.

COSTABILE, P.; CONSTANZO, C.; FERRARO, D.; MACCHIONE, F.; PETACCIA, G. Performances of the new HEC-RAS Version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale: Comparison with a state-of-the-art model. **Water**, 12, 2326, 2020.

CRED – Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **History**. 2009. Disponível em: [HTTP://www.emdat.be/history](http://www.emdat.be/history) Acesso em: 11 de Março de 2020.

CRED. **Natural Disasters 2017**. Brussels: CRED, 2018.

CRED. **Natural Disasters 2018**. Brussels: CRED, 2019.

CRUZ, Antônio. Enchentes em Alagoas e Pernambuco em 2010, **Wikipedia**. 2010. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Enchentes\\_em\\_Alagoas\\_e\\_Pernambuco\\_em\\_2010](https://pt.wikipedia.org/wiki/Enchentes_em_Alagoas_e_Pernambuco_em_2010). Acesso em: 18 de setembro de 2018.

CUSTO unitário básico. **SINDUSCON JP**. 2010. Disponível em: <https://www.sindusconjp.com.br/servicos/> >. Acesso em: 30 de agosto de 2018.

CUSTO unitário básico. **SINDUSCON PE**. 2021. Disponível em: <http://www.sindusconpe.com.br/servicos/cub>>. Acesso em: 01 de março de 2021.

DANTAS, C. E. O. **Previsão e controle de inundações em meio urbano com suporte de informações espaciais de alta resolução**. 2012. 220f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

DANTAS, C. E. O.; CIRILO, J. A.; RIBEIRO NETO, A.; SILVA E. R. Caracterização da formação de cheias na bacia do rio Uma em Pernambuco: análise estatística regional. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.19, n.4, 2014.

DECINA, T. G. T.; BRANDÃO, J. L. B. Análise de desempenho de medidas estruturais e não estruturais de controle de inundações em uma bacia urbana. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.21, n.1, 2016.

DEVI, N. N.; SRIDHARAN, B.; KUIRY, S. N. Impacto f urban sprawl on future flooding in Chennai city, India. **Journal of Hydrology**, v.574, p.486-496, 2019.

ELMER, F.; THIEKEN, A. H.; PECH, I.; KREIBICH, H. Influence of flood frequency on residential building losses. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.1, p.2145-2159, 2010.

FADEL, A. W.; MARQUES, G. F.; GOLDENFUM, J. A. Mapeamento do risco de prejuízo como medida de gestão de adaptação às inundações. **Geociências**, v.37, n.1, p.121-136, 2018a.

FADEL, A. W.; MARQUES, G. F.; GOLDENFUM, J. A.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; TILMANT, A. Full Flood Cost: Insights from a risk analysis perspective. **Journal of Environmental Engineering**, v.144, n.9, p.04018071, 2018b.

FELDMAN, A. D. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. 155 p.

FERRAZ, G. F. **Simulação hidrológica e hidrodinâmica do impacto de enchentes na bacia do rio Sirinhaém e avaliação de sistema de controle proposto**. 2019. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FLEISCHMANN, A. S.; BRÊDA, J. P. F.; PASSAIA, O. A.; WONGCHUIG, S. C.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; MARQUES, G. F.; COLLISCHONN, W. Regional scale hydrodynamic modeling of the river-floodplain-reservoir continuum. **Journal of Hydrology**, v.596, p.126114, 2021.

FRAGOSO, M. L. C. **Desastre, risco e vulnerabilidade socioambiental no território da mata Sul de Pernambuco/Brasil**. 2013. 133f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

FRAMEWORK. In: Cambridge Dictionary. Cambridge: Cambridge University Press. Disponível em: <http://dictionary.cambridge.org> Acesso em: 01 jun 2019.

FREIRE, N. C. F.; NATENZON, C. E. Vulnerabilidad social, inundaciones catastróficas y geo-tecnologías em regiones sebedesarrolladas. Riesgo e incertidumbres em el Litoral Norte de La Provincia de Alagoas – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.6, n.5, 2013.

GAI, L.; NUNES, J. P.; BAARTMAN, J. E. M.; ZHANG, H.; WANG, F.; ROO, A.; RITSEMA, C. J.; GEISSEN, V. Assessing the impact of human interventions on floods and low flows in the Wei River Basin in China using the LISFLOOD model. **Science of the Total Environment**, v.653, p.1077-1094, 2019.

GARROTE, J.; ALVARENGA, F. M.; DÍEZ-HERRERO, A. Quantification of flash flood economic risk using ultra-detailed stage-damage functions and 2-D hydraulic models. **Journal of Hydrology**, v.541, p.611-625, 2016.

GARROTE, J.; BERNAL, N.; DÍEZ-HERRERO, A.; MARTINS, L. R.; BODOQUE, J. M. Civil engineering works versus self-protection measures for the mitigation of floods economic risk. A case study from a new classification criterion for cost-benefit analysis. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.37, p.101157, 2019.

GOETHE, P. **O Recife que vem se inundando por conta própria**. Disponível em: <http://blogs.diariodepernambuco.com.br/diretodaredacao/2016/05/30/20687/> Acesso em: 08 out 2016.

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M.; PELLERIN, J. R. G. Proposta metodológica para mapeamento de áreas de risco de inundação: Estudo de caso do município de Rio Negrinho – SC. **Boletim de Geografia**, v.30, n.1, p.81-100, 2012.

GONZÁLEZ, D. P.; MONSALVE, M.; MORIS, R.; HERRERA, C. Risk and resilience monitor: Development of multiscale and multilevel indicators for disaster risk management for the communes and urban áreas of Chile. **Applied Geography**, v.94, p.262-271, 2018.

GOODELL, C. **2D Troubleshooting – Fragmented Inundation**. 2015. Disponível em: <http://kleinschmidtgroup.com/ras-post/2d-troubleshooting-fragmented-inundation/> Acesso em: 16 de Março de 2021.

GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, Ph.; WALLEMACQ, P.; BELLOW, R. **Annual Disaster Statistical Review 2016: The Numbers and Trends**. Brussels: CRED, 2016.

HAER, T.; BOTZEN, W.; ZAVALA-HIDALGO, J.; CUSELL, C.; WARD, P. J. Economic evaluation of climate risk adaptation strategies: Cost-benefit analysis of flood protection in Tabasco, Mexico. **Atmosfera**, v.30, n.2, p.101-120, 2017.

HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C. T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **International Journal Disaster Risk Science**, v.7, p.111-122, 2016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Palmares**. IBGE: Rio de Janeiro, 2014. Disponível em <http://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/palmares> Acesso em 14 de Novembro de 2018.

ITEP – Instituto de Tecnologia de Pernambuco. **Relatório de Impacto Ambiental: Estudo de Impacto Ambiental – EIA: Sistema de Controle de Cheias da Bacia do Rio Una – Barragem Serro Azul**. Instituto de Tecnologia de Pernambuco: Recife, 2011. 41p.

IZUMI, T.; SHAW, R.; DJALANTE, R.; ISHIWATARI, M.; KOMINO, T. Disaster risk reduction and innovations. **Progress in Disaster Science**, v.2, p.100033, 2019.

JAHANGIRI, K.; EIVAZI, M-R.; MOFAZALI, A. S. The role of foresight in avoiding systematic failure of natural disaster risk management. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.21, p.303-311, 2017.

JONOV, C. M. P.; NASCIMENTO, N. O. SILVA, A. P. Avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtenção dos custos de recuperação. **Ambiente construído**, v.13, n.3, p.75-94, 2013.

KANG, J-L.; SU, M-D.; CHANG, L-F. Loss functions and framework for regional flood damage estimation in residential area. **Journal of Marine Science and Technology**, v.13, n.3, p.193-199, 2005.

KHERADMAND, S.; SEIDOU, O. KONTE, D.; BATOURE, M. B. B. Evaluation of adaptation options to flood risk in a probabilistic framework. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v.19, p.1-16, 2018.

KREIBICH, H.; PIROTH, K.; SEIFERT, I.; MAIWALD, H.; KUNERT, U.; SCHWARZ, J.; MERZ, B.; THIEKEN, A. H. Is flow velocity a significant parameter in flood damage modeling? **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v.9, p.1679-1692, 2009.

LAVELL, A.; OPPENHEIMER, M.; DIOP, C.; HESS, J.; LEMPERT, R.; LI, J.; MUIR-WOOD R.; MYEONG, S.. **Climate change: new dimensions in disaster risk, exposure, vulnerability and resilience**. In *Managing Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. [FIELD, C.B.; BARROS, V.; STOCKER, T. F.; QIN, D.; DOKKEN, D. J.; EBI, K. L.; MASTRANDEA, M. D.; MACH, K. J.; PLATTNER, G.-K.; ALLEN, S. K.; TIGNOR, M.; MIDGLEY, P. M. (ed.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p.25-64, 2012.

LI, W.; LIN, K.; ZHAO, T.; LAN, T.; CHEN, X.; DU, H.; CHEN, H. Risk assessment and sensitivity analysis of flash floods in ungauged basins using coupled hydrologic and hydrodynamic models. **Journal of Hydrology**, v.572, p.108-120, 2019.

LIMA, C. O.; BONETTI, J. Proposta metodológica para adequação das informações do Censo Demográfico do IBGE na análise da vulnerabilidade social a eventos extremos na Zona Costeira. **Revista Brasileira de Geografia**, v.63, n.2, p.122-140, 2018.

LIMA NETO, O. C. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica com intervalo de tempo sub-diário na bacia do rio Una em Pernambuco**. 2019. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

MACHADO, M. L.; NASCIMENTO, N.; BAPTISTA, M.; GONÇALVES, M.; SILVA, A.; LIMA, J. C.; DIAS, R.; SILVA, A.; MACHADO, E.; FERNANDES, W. Curvas de danos de inundação versus profundidade de submersão: desenvolvimento de metodologia. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v.2, n.1, p.35-52, 2005.

MARCHESE, D.; REYNOLDS, E.; BATES, M. E.; MORGAN, H.; CLARK, S. S.; LINKOV, I. Resilience and sustainability: Similarities and differences in environmental management applications. **Science of the Total Environment**, p.613-614, 2018.

MAVHURA, E.; MANYENA, B.; COLLINS, A. E. An approach for measuring social vulnerability in context: The case of flood hazards in Muzarabani district, Zimbabwe. **Geoforum**, v.86, p.103-117, 2017.

McGRATH, H.; EZZ, A. E.; MIROSLAV, N. **Development of probabilistic cost function for flood damage to residential structures**. Fredericton: Canadian Society for Civil Engineering, 2018. 8p.

McGRATH, H.; STEFANAKIS, E.; NASTEV, M. Sensitivity analysis of flood damage estimates: A case study in Fredericton, New Brunswick. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.14, p.379-387, 2015.

MELO, V. B. **Aplicação de informações espaciais de alta resolução para estudo de ocorrências de inundações urbanas**. 2021. 224f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021.

MERZ, B.; DISSE, M.; SCHUMANN, A. Fluvial flood risk management in a changing world. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 10, p.509-527, 2010.

MERZ, B.; THIEKEN, A. H.; GOCHT, M.. **Flood Risk Mapping at the local scale: Concepts and Challenges**. Flood Risk Management in Europe, p.231-251, 2007.

MILI, R. R.; HOSSEINI, K. A.; IZADKHAH, Y.O. Developing a holistic model for earthquake risk assessment and disaster management interventions in urban fabrics. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.27, p.355-365, 2018.

MOLINARI, D.; BRUIJN, K. M.; CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T.; ARONICA, G. T. BOUWER, L. M. Validation of flood risk models: Current practice and possible improvements. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.33, p.441-448, 2019.

NAGEM, F. R. M. **Avaliação econômica dos prejuízos causados pelas cheias urbanas**. 2008. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

NAKAGAWA, S.; SAMARASINGHE, G.; HADDAWAY, N. R.; WESTGATE, M. J.; O'DEA, R. E.; NOBLE, D. W. A.; LAGISZ, M. Research weaving: visualizing the future of research synthesis. **Trends in Ecology & Evolution**, v.4, n.3, 2019.

NATURAL. In: Michaelis Online, Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. São Paulo: Melhoramentos. Disponível em: <http://michaelis.uol.com.br/> Acesso em: 14 de Maio de 2019.

NHARO, T.; MAKURIRA, H.; GUMINDOGA, W. Mapping floods in the middle Zambezi Basin using earth observation and hydrological modeling techniques. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.114, p.102787, 2019.

OGIE, R.I.; HOLDERNESS, T.; DUNN, S.; TURPIN, E. Assessing the vulnerability of hydrological infrastructure to flood damage in coastal cities of developing nations. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.68, p.97-109, 2018.

OLIVEIRA, G.A.; BRITO, P. L.; SANTOS, S. M. Mapeamento de riscos hidrológicos utilizando informações geográficas voluntárias: Estudo de caso no município de Riachão do Jacuípe-Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, p.297-311, 2018.

OLIVEIRA, J. P. Q. **Palmares resiliente: a reconstrução do urbano após as enchentes de 2010/11.** 2015. 127f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

OLIVERI, E.; SANTORO, M. Estimation of urban structural flood damage: the case study of Palermo. **Urban Water**, v.2, p.223-234, 2000.

ONGDAS, N.; AKIYANOVA, F.; KARAKULOV, Y.; MURATBAYEVA, A.; ZINABDIN, N. Application of HEC-RAS (2D) for flood hazard maps generation for Yesil (Ishim) River in Kazakhstan. **Water**, v.12, p.2672, 2020.

OUBENNACEUR, K.; CHOKMANI, K; NASTEV, M.; LHISSOU, R.; ALEM, A. E. Flood risk mapping for direct damage to residential buildings in Quebec, Canada. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, 33, p.44-54, 2019.

PARK, K., WON, J. Analysis on distribution characteristics of building use with risk zone classification based on urban flood risk assessment. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.38, p.101192, 2019.

PENNING-ROUSELL, E. C.; CHATTERTON, J. B. **The benefits of flood alleviation.** Farnborough: Saxon House, 1977. 297p.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). Controle de cheias. Recife, 2011. Disponível em: [http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=327](http://www.srhe.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=327). Acesso em: 27 de setembro de 2018.

PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos (SRHE). **Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe: Tomo I – diagnóstico hidroambiental** volume 01/03. Recife: 2010.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA). **Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco – PERH.** Recife: 1998. 8v.

PORTAL FOLHA PE. **Chuvas em Pernambuco deixam 35 mil desabrigados.** 2017. Disponível em: <http://www.folhape.com.br/> Acesso em: 14 de Novembro de 2018.

PREFEITURA DOS PALMARES. **História.** 2017. Disponível em: <https://palmares.pe.gov.br/a-prefeitura/> Acesso em: 24 de julho de 2018.

QIANG, Y. Disparities of population exposed to flood hazards in the United States. **Journal of Environmental Management**, v.232, p.295-304, 2019.

QUARENTA anos do maior desastre natural ocorrido no Recife: a enchente de julho de 1975. **Riachos Urbanos do Recife.** 2015. Disponível em: <https://riachosurbanos.blogspot.com/2015/07/40-anos-do-maior-desastre-natural.html>. Acesso em: 18 de setembro de 2018.

RANA, I. A.; ROUSTRAY, J. K. Integrated methodology for flood risk assessment and application in urban communities of Pakistan. **Natural Hazards**, v.98, p.239-266, 2018.

RIBEIRO, A. A. S.; OLIVEIRA, G. A.; CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. A.; BATISTA, L. F. D. R.; MELO, V. B. Reconstituição de manchas de inundação baseada em dados coletados via smartphones: uma abordagem metodológica para o mapeamento de riscos hidrológicos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.25, 2020.

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, 2015.

RIBEIRO NETO, A.; BATISTA, L. F. D. R.; COUTINHO, R. Q. Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.21, n.2, 2016.

ROOS, M. M. D.; HARTMANN, T. T.; SPIT, T. T. J. M.; JOHANN, G. G. Constructing risks – Internalisation of flood risks in the flood risk management plan. **Environmental Science and Policy**, v.74, p.23-29, 2017.

SAHARIA, M.; KIRSTETTER, P-E.; VERGARA, H.; GOURLEY, J. J.; HONG, Y. Characterization of floods in the United States. **Journal of Hydrology**, v.548, p.524-535, 2017.

SAJA, A. M. A.; TEO, M.; GOONETILLEKE, A.; ZIYATH, A. M. An inclusive and adaptive framework for measuring social resilience to disasters. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.28, p.862-873, 2018.

SALGADO, J. C. M. **Avaliação econômica de projetos de drenagem e de controle de inundações em bacias urbanas**. 1995. 113f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1995.

SANTOS, P. P.; PEREIRA, S.; ZÉZERE, J. L.; TAVARES, A. O. REIS, E.; GARCIA, R. A. C.; OLIVEIRA, S. C. A comprehensive approach to understanding flood risk drivers at the municipal level. **Journal of Environmental Management**, v.260, p.110127, 2020.

SANTOS, K. A. **Modelagem do acompanhamento e controle de cheias em bacias hidrográficas de grande variação de altitude**. Estudo de caso: Bacia do rio Mundaú. 2013. 107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

SCAWTHORN, C.; ASCE, F.; BLAIS, N.; SELIGON, H.; TATE, E.; MIFFLIN, E.; THOMAS, W.; MURPHY, J.; JONES, C. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. I: Overview and flood hazard characterization. **Natural Hazards Review**, v.7, p.60-71, 2006a.

SCAWTHORN, C.; ASCE, F. FLORES, P.; BLAIS, N.; SELIGSON, H.; TATE, E.; CHANG, S.; MIFFLIN, E.; THOMAS, W.; MURPHY, J.; JONES, C.; LAWRENCE, M. HAZUS-MH flood loss estimation methodology. II. Damage and Loss Assessment. **Natural Hazards Review**, v.7, p.72-81, 2006b.

SCHARFFENBERG, B.; BARTLES, M.; BRAUER, T.; FLEMING, M.; KARLOVITS, G. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual**. Davis: U.S. Army Corps of Engineers, 2018. 640p.

SHRESTHA, B. B.; KAWASAKI, A. Quantitative assessment of flood risk with evaluation of the effectiveness of dam operation for flood control: A case of the Bago River Basin of Myanmar. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.50, p.101707, 2020.

SHRESTHA, S.; LOHPAISANKRIT, W. Flood hazard assessment under climate change scenarios in the Yang River Basin, Thailand. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v.6, p.285-298, 2017.

SHUSTIKOVA, I.; DOMONEGHETTI, A.; NEAL, J. C.; BATES, P.; CASTELLARIN, A. Comparing 2D capabilities of HEC-RAS and LISFLOOD-FP on complex topography. **Hydrological Sciences Journal**, v.64, n.14, p.1769-1782, 2019.

SILVA, E. R. **Modelagem integrada para controle de cheias, previsão e alerta de inundações**: Estudo de caso da bacia do rio Una em Pernambuco. 2015. 145f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SOLÍN, L.; MADAJOVÁ, M. S.; MICHALEJE, L. Vulnerability assessment of households and its possible reflection in flood risk management: The case of the upper Myjava basin, Slovakia. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.28, p.640-652, 2018.

SOUSA, D. P. S.; GOERL, R. F. Proposta metodológica para estimar danos relacionados à inundação em áreas urbanas. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial**, 13, 2018, Florianópolis: Anais... Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SRHE – Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco. **Ficha técnica com cota volume**. SRHE: Recife, 2019.

TACHINI, M. **Avaliação de danos associados às inundações no município de Blumenau**. 2010. 167f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TANWATTANA, P. Systematizing community-based disaster risk management (CBDRM): Case of urban flood-prone community in Thailand upstream area. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.28, p.798-812, 2018.

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W. DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modeling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v.90, p.201-216, 2017.

TÎNCU, R.; ZÊZERE, J. L.; CRACIUM, I.; LAZAR, G.; LAZAR, I. Quantitative micro-scale flood risk assessment in a section of the Trotus River, Romania. **Land Use Policy**, v.95, p.103881, 2020.

TORABI, E.; DEDEKORKUT-HOWES, A.; HOWES, M. Adapting or maladapting: Building resilience to climate-related disasters in coastal cities. **Cities**, v.72, p.295-309, 2018.

TURRERO, P.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M. J.; JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M.; GARCÍA-VÁSQUEZ, E. The spatial distribution of Palaeolithic human settlements and its influence on palaeoecological studies: a case from Northern Iberia. **Journal of Archaeological Science**, v.40, p.4127-4138, 2013.

UFSC - UNIVERSIDADE Federal de Santa Catarina. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010**: volume Brasil / Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Florianópolis: CEPED UFSC, 2012. 94p.

UNISDR – The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015 – 2030**. UNISDR: Genebra, 2015.

UNISDR – The United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva: UNISDR, 2009.

VALENCIO, N. F. L. S. Desastres: tecnicismo e sofrimento social. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.19, p. 3631-3644, 2014.

VU, T. T.; RANZI, R. Flood risk assessment and coping capacity of floods in central Vietnam. **Journal of Hydro-environment Research**, v.14, p.44-60, 2017.

WHELCHER, A. W.; REGUERO, B. G.; WESENBEECK, B.; RENAUD, F. G. Advancing disaster risk reduction through the integration of science, design, and policy into eco-engineering and several global resource management processes. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.32, p.29-41, 2018.

WIN, S.; ZIN, W. W.; KAWASAKI, A.; SAN, Z. M. L. T. Establishment of flood damage function models: A case study in the Bago River Basin, Myanmar. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.28, p.688-700, 2018.

ZHANG, W.; LI, W.; ZHANG, C.; HANINK, D. M.; LI, X.; WANG, W. Parcel-based urban land use classification in megacity using airborne LiDAR, high resolution orthoimagery, and Google Street View. **Computer, Environment and Urban Systems**, v.64, p.215-228, 2017a.

ZHANG, W.; LI, W.; ZHANG, C.; HANINK, D. M.; LI, X.; WANG, W. Parcel feature data derived from Google Street View images for urban land use classification in Brooklyn, New York City. **Data in Brief**, v.12, p.175-179, 2107b.

ZIO, E. The future of risk assessment. **Reliability Engineering and System Safety**, v.177, p.176-190, 2018.

## APÊNDICE A — ESTRUTURA DO BANCO DE DADOS CADASTRAL

Na tabela de atributos referentes às edificações expostas constam as seguintes informações:

- ID
- Rua
- Número
- Tipo construtivo de acordo com a NBR 12721:2005
- Uso
- Número de pavimentos
- Área de cobertura (m<sup>2</sup>)
- Padrão construtivo de acordo com a NBR 12721:2005
- Número de unidades residenciais por lote
- Observações
- Profundidade média da água em cada lote, por evento

Interessante destacar que vários dos cálculos relativos a danos foram realizados dentro da própria tabela, em ambiente SIG.

## APÊNDICE B — ESTRUTURA DOS FORMULÁRIOS

- **Tirar uma foto da fachada**
- **Rua**
- **Nº da casa**
- **Programa Arquitetônico:**

Dormitórios: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Suítes: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Sala de estar: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Sala de jantar: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Circulação: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Cozinha: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Área de serviço: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Varanda: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Abrigo para automóvel: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Banheiro social: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

Banheiro de serviço: 0( ) 1( ) 2( ) 3( ) 4 ou +( )

- **O morador já vivenciou/lembra algum evento de inundação?**

*(Data. Altura da água. Perdeu algo na cheia? Houve algum dano à residência? Alguém se machucou?...)*

- **Observações**

Figura A-1: Aplicação dos questionários



## APÊNDICE C– MEMORIAL DE CAMPO

No decorrer desta pesquisa foram planejadas visitas de campo, as quais foram detalhadas na metodologia. Tais visitas tinham por objetivo apenas o levantamento de dados referentes às construções, principalmente as residenciais, e a busca por uma compreensão maior das dinâmicas locais. No entanto, a experiência provou-se muito mais rica. A conversa com os moradores revelou o lado mais frágil do desastre, o lado da população. Este item traz um relato mais jornalístico das inundações ocorridas em Palmares, deixando aqui registrada a experiência dos moradores que de modo muito solícito dividiram suas memórias. Esta é uma singela, ínfima, demonstração de agradecimento. O foco desta pesquisa é a engenharia, mas a natureza de sua temática é multidisciplinar e abrangente, portanto, acredita-se pertinente tal registro.

Como a pesquisa abrange danos de inundação, as entrevistas foram realizadas apenas com moradores cujas residências estivessem dentro do perímetro da inundação de 2010, a maior já registrada na bacia do rio Una. Dos 150 moradores entrevistados, a grande maioria reside em Palmares a muitos anos. Quando questionados acerca dos prejuízos decorrentes de inundações, a resposta foi quase unânime, tudo foi perdido, repetidas vezes, com destaque para o grande evento de 2010. Neste último, além de todos os bens pessoais, os danos causados às residências foram diversos. Forros, pisos, acabamentos e portas danificadas. Cobertas e paredes levadas pela água. Muita lama, sujeira e mau cheiro deixado para trás. A limpeza interna foi realizada majoritariamente pela própria população, que sem água e sem energia demorou alguns meses para voltar para casa. Felizmente, entre os entrevistados não houve qualquer relato de morte, apenas alguns casos de doença ou leves ferimentos.

O pós-desastre decorreu com um auxílio de R\$150,00 mensais aos moradores atingidos e com a proposta de deslocamento dessa população para outra região do município, um bairro nomeado de Quilombo, mais alto e mais distante das margens do rio. Lá foram construídas casas populares posteriormente oferecidas à população exposta. Registram-se aqui os mais diversos casos. Pessoas que receberam casas e não tinham sido atingidas pela inundação. Pessoas que foram atingidas pela inundação e não receberam casas. Inquilinos que receberam casas e proprietários que não receberam. Pessoas que recusaram a oferta, por questões de

saúde e deslocamento, visto que o bairro do Quilombo é um pouco distante do centro. Pessoas que possuíam uma ou mais residências e não quiseram trocar pela casa popular oferecida pelo governo, pois não havia equivalência de custos. Pessoas que realizaram o cadastro, mas nunca obtiveram resposta.

Com uma população estimada pelo IBGE de pouco mais de 62 mil habitantes, Palmares conserva um espírito de cidade de interior, mesmo estando a duas horas da capital. Os eventos recorrentes deixam na população resquícios perceptíveis. Em uma das residências os móveis foram todos reconstruídos em cimento, enquanto em outra, a moradora relatou que mantinha seus pertences em sacolas caso precisasse abandonar sua casa às pressas. A experiência vivida, ao mesmo tempo em que expõe uma população naturalmente instruída acerca de conceitos referentes ao risco, revela problemas de saúde relacionados aos traumas vividos. Em 2010, a inundação atingiu a cidade com profundidades nunca antes vistas, numa velocidade muito grande. Alguns moradores que não conseguiram sair ou decidiram permanecer em suas residências de mais de um pavimento tiveram de ser resgatados de helicóptero.

Mesmo com a construção da barragem de Serro Azul e sua constatada importância para redução dos danos, alguns moradores não suportam a tensão que experimentam sempre que chove mais forte e terminam por se mudar. Com grandes desníveis no terreno, Palmares ainda preserva os traços de sua criação, alta densidade nas margens do rio Una, mas já apresentando expansões em áreas de relevo mais elevado. O destaque fica para a resiliência de sua população por tudo que já viveu e por todas as vezes que precisou recomeçar.