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

JÚLIA SANTOS HUMBERTO

PROPOSIÇÃO DE MODELO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES

Recife
2020

JÚLIA SANTOS HUMBERTO

PROPOSIÇÃO DE MODELO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.

Recife

2020

Catalogação na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

H919p Humberto, Júlia Santos.
Proposição de modelo multicritério para gerenciamento de risco de inundações / Júlia Santos Humberto. – 2020.
86 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Adiel Teixeira de Almeida.
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2020.
Inclui Referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Decisão multicritério. 3. MAUT. 4. Gerenciamento de riscos. 5. Desastres naturais. 6. SIG. I. Almeida, Adiel Teixeira de. (Orientador). II. Alencar, Marcelo Hazin (Coorientador). III. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.) BCTG/2020-76

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

JÚLIA SANTOS HUMBERTO

"PROPOSIÇÃO DE MODELO MULTICRITÉRIO PARA GERENCIAMENTO DE RISCO DE INUNDAÇÕES"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o candidato Júlia Santos Humberto **APROVADO.**

Recife, 18 de Fevereiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

_____
Prof. Marcelo Hazin Alencar, PhD (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante, PhD (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____
Prof. André Luís Policani Freitas, PhD (Examinador Externo)
Universidade Estadual do Norte Fluminense

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pela a oportunidade de concretizar este sonho.

Obrigada aos meus pais, Humberto e Margarida e a minha irmã Laura, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em cada etapa dos meus estudos e da minha vida. Agradeço também ao meu querido Marcio, por estar presente nesta trajetória de maneira tão amorosa e a minha grande família, pelo carinho, suporte e por sempre torcerem por mim.

Ao meu orientador Adiel Teixeira de Almeida, pelos ensinamentos prestados e orientação. Ao meu coorientador Marcelo Hazin Alencar, pelo apoio constante e paciência durante a elaboração deste trabalho.

Sou também grata a todo corpo de profissionais que compõe o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFPE, desde os professores, a banca da defesa da dissertação, aos funcionários e colaboradores por contribuírem diretamente na minha formação.

Por fim, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) por proporcionarem o desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

O crescimento populacional, o desenvolvimento econômico e as mudanças climáticas têm aumentado o impacto das inundações em várias partes do mundo, podendo provocar mortes, ferimentos, proliferação dos vetores de doenças, danos às propriedades e a interrupção do comércio e serviços básicos. Neste cenário, a mitigação e prevenção dos desastres causados pelas inundações são um desafio significativo para os formuladores de políticas públicas, profissionais técnicos, organizações e sociedade civil. Sob essa perspectiva, esta pesquisa realiza um estudo de riscos multidimensionais de inundações baseado na Teoria da Decisão e Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) para apoiar a priorização do risco de inundação em áreas urbanas. São consideradas três dimensões de consequência: humana, econômica e social. O modelo de decisão multicritério proposto permite que o decisor obtenha uma lista hierárquica de riscos do conjunto formado pelas zonas que compreendem a área urbana em estudo. Adicionalmente, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) atua como uma ferramenta suplementar para contribuir com o processo de tomada de decisão, gerando mapas das áreas de risco e auxiliando na adoção de ações para reduzir os impactos das inundações. Portanto, o uso do modelo de priorização de risco torna mais simples a tomada de decisão para alocação de recursos, uma vez que permite que estes sejam geridos e alocados primeiramente àquelas alternativas mais críticas. Além disso, o modelo possui flexibilidade, podendo ser replicado em qualquer região do mundo e apresenta uma proposta alternativa com potencial de melhorias de gestão, possibilitando ao tomador de decisão ter acesso a uma gama maior de informações.

Palavras-chave: Decisão multicritério. MAUT. Gerenciamento de riscos. Desastres naturais. SIG.

ABSTRACT

Population growth, economic development, and climate change have increased the impact of flooding in various parts of the world, leading to deaths, injuries, the proliferation of disease vectors, property damage and disruption of trade and basic services. In this scenario, mitigation and prevention of flood disasters are a significant challenge for public policy-makers, technical professionals, organizations and civil society. From this perspective, this research conducts a study of multidimensional flood risk based on decision theory and multiattribute utility theory (MAUT) to support the prioritization of flood risk in urban areas. Three dimensions of consequence are considered: human, economic and social. The proposed multicriteria decision model allows the decision-maker to obtain a hierarchical list of risks from the set comprising the zones that comprise the urban area under study. Additionally, a Geographic Information System (GIS) acts as a supplementary tool to contribute to the decision-making process, generating maps of risk areas and assisting in the adoption of actions to reduce flood impacts. Therefore, the use of the risk prioritization model makes it easier to decide to allocate resources, since it allows them to be managed and allocated first to those most critical alternatives. Also, the model has flexibility, being able to be replicated in any region of the world and presents an alternative proposal with potential for management improvements, enabling decision-makers to have access to a wider range of information.

Keywords: Multicriteria decision. MAUT. Risk management. Natural disaster. Flood. GIS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8
1.1 Justificativa 9
1.2 Objetivos do Trabalho 10
1.2.1 Objetivo Geral 10
1.2.2 Objetivos Específicos 10
1.3 Estrutura do Trabalho 11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 12
2.1 Fundamentação Teórica 12
2.1.1 Decisão Multicritério 12
2.1.1.1 Teoria da Utilidade Multiatributo 14
2.1.2 Teoria da Decisão 18
2.1.3 Mudanças climáticas e seus efeitos nos centros urbanos 19
2.1.4 Inundações 20
2.1.5 Gerenciamento de risco de inundações 22
2.1.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) 26
2.2 Revisão da Literatura 29
2.2.1 Uso de métodos MCDM/A no gerenciamento de risco de inundações 29
2.2.2 Integração de técnicas MCDM e SIG no contexto de risco de inundação 30
2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho 32
3 METODOLOGIA 34
3.1 Descrição do problema 34
3.2 Descrição do Modelo 35
3.3 Aplicação do Modelo e Discussão Preliminar dos Resultados 51
3.4 Análise espacial dos resultados 63
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 75
4.1 Conclusões 75
4.2 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros 76
REFERÊNCIAS 78

1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são um crescente desafio, tendo em vista que são um fenômeno mundial que causam grande devastação, impactos econômicos e perdas de vidas humanas. As áreas urbanas podem apresentar altos níveis de risco de inundação devido às altas taxas de densidade populacional, múltiplas atividades econômicas, infraestruturas e propriedades (PELLING, 2003).

As mudanças climáticas também contribuem para os altos níveis de risco de inundação. Estudos mostram que os desastres relacionados ao clima representam 91% de todos os 7.255 eventos registrados entre 1998 e 2017. Nesse contexto, as inundações foram o tipo de desastre mais frequente, representando 43,4% de todos os eventos registrados. Além disso, as inundações também afetaram o maior número de pessoas, em mais de dois bilhões e foram responsáveis por 11% das fatalidades, isto é, 142.088 pessoas morreram, nesse mesmo período (CRED-UNISDR, 2018).

Neste contexto, os impactos de eventos extremos de inundação incluem efeitos diretos nos meios de subsistência, propriedade, saúde, produção e comunicação, juntamente com efeitos indiretos dessas consequências na economia em geral (HANDMER *et al*., 2012).

Como resultado de eventos anteriores de inundações e suas consequências, a demanda da sociedade por níveis mais altos de segurança se tornou um grande desafio para os governantes. Diante disto, é fundamental que seja dada atenção ao gerenciamento de risco das inundações, sendo essencial o papel dos governantes nesse processo, a partir de tomada de decisões apropriadas e estruturadas para prevenir e mitigar as inundações.

Nesse sentido, governos, organizações internacionais, pesquisadores e agências de gerenciamento de emergências buscam cada vez mais formas eficientes de responder às possíveis consequências decorrentes de desastres naturais (NASCIMENTO; ALENCAR, 2016).

O gerenciamento de inundações é um processo complexo, multifacetado, que envolve vários tomadores de decisão e informações técnicas limitadas e difíceis compensações (LEVY *et al*., 2007).

Sob essa perspectiva, o uso de ferramentas de tomada de decisões multicritério (MCDM) podem fornecer vantagens, uma vez que possibilitam levar em consideração as visões de múltiplos *stakeholders*, objetivos, *tradeoffs*, alternativas viáveis, e critérios de avaliação (DE BRITO; EVERS, 2016).

Adicionalmente, o uso de sistemas de informações geográficas (SIG) pode contribuir para o processo decisório, uma vez que possui capacidade para lidar com uma ampla gama de dados de critérios, além de fornecer mapas de inundação que são essenciais para o gerenciamento de risco (GIGOVIĆ *et al*., 2017).

Portanto, a combinação de recursos MCDM e SIG pode ajudar os responsáveis pelas decisões a gerenciar esse risco, através de avaliações mais detalhada do risco de inundação. Sob essa ótica, propõe-se um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para gerenciar o risco de inundações, a partir da priorização do risco de inundação em áreas urbanas, inserindo em sua análise recursos de geoprocessamento como ferramenta suplementar para contribuir com o processo decisório.

1.1 Justificativa

As áreas urbanas estão se tornando cada vez mais vulneráveis às inundações devido à rápida urbanização, instalação de infraestrutura complexa e mudanças nos padrões de precipitação causadas pelas mudanças climáticas antropogênicas (WILLEMS *et al*., 2012).

Os impactos podem ser significativos, com a interrupção dos serviços, danos à infraestrutura e propriedades, perdas de vidas humanas, entre outros. Nesse contexto, a demanda por um processo de gestão de risco que aborde um panorama completo dos parâmetros envolvidos na ocorrência de inundações será ampliada, haja vista o nível de exposição crescente dos centros urbanos (HUMBERTO *et al.*, 2019).

Posto isto, este estudo possui uma grande relevância à sociedade, ao setor público e privado, em virtude dos impactos que as inundações podem causar. A importância de avaliar os riscos de forma abrangente e realista fornece conhecimento que pode ser colocado em prática, a fim de auxiliar os formuladores de políticas públicas na escolha de ações preventivas e mitigadoras.

Vários estudos ressaltam que uma abordagem de avaliação de risco que utiliza apenas uma única dimensão de risco pode não ser o bastante para abranger da forma mais realista e eficiente a avaliação de risco, assim, a consideração de várias dimensões tem demonstrado ser um meio eficiente de avaliar os riscos, visto que diferentes pontos de vista podem influenciar o processo decisório (BRITO; DE ALMEIDA, 2009; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2010; LINS; DE ALMEIDA, 2012).

Além disso, uma vez que no mundo real há limitações de recursos disponíveis para serem alocados, é essencial o uso de ferramentas de tomada de decisão que agreguem as

consequências e incertezas para que os riscos sejam avaliados em conjunto com a estrutura de preferência do decisor, visando assim solucionar o problema de forma mais efetiva.

Nesse sentido, como contribuição deste trabalho, propõe-se um modelo de decisão multicritério, no qual se geram medidas de risco de zonas que compõem a área de estudo, sendo então ordenados a fim de fornecer uma priorização na alocação de recursos disponíveis para prevenção e mitigação de riscos, tais como construção de medidas estruturais e adoção de medidas não estruturais. Vale salientar que estas zonas são áreas limitadas através de parâmetros reguladores de uso e ocupação do solo definido no Plano Diretor do município. Ainda, serão propostas análises mais aprofundadas das medidas de riscos que podem ser geradas pela avaliação das razões das diferenças de riscos.

Adicionalmente, o trabalho contribui para o estado da arte, considerando aspectos probabilísticos inerentes ao contexto da decisão, integrando, assim, as abordagens MAUT e Teoria da Decisão, em um modelo desenvolvido em 9 etapas.

1.2 Objetivos do Trabalho

Segue nesta seção, o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

Propõe-se um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para gerenciar o risco de inundações, a partir da priorização do risco de inundação em áreas urbanas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica para definição dos atributos;
- Estruturar o modelo de decisão multicritério para a análise das consequências das dimensões social, econômica e humana;
- Realizar uma modelagem hidrodinâmica para obtenção da mancha de inundação;
- Mapear o risco de inundação em um sistema de informação geográfica;
- Realizar uma aplicação numérica do modelo, em um cenário hipotético, para ilustrar os resultados e interpretações advindas do modelo proposto.

1.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está estruturado em 4 capítulos a seguir:

O Capítulo 1, a Introdução, apresenta as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho e os objetivos do estudo.

O Capítulo 2, apresenta a fundamentação teórica de decisão multicritério, teoria da utilidade multiatributo, teoria da decisão, mudanças climáticas e seus efeitos nos centros urbanos, inundações, gerenciamento de risco de inundações e sistemas de informações geográficas. Realiza-se também a revisão bibliográfica sobre o uso de métodos MCDM no contexto de gerenciamento de risco de inundações, bem como a sobre a integração de técnicas MCDM e SIG no contexto de risco de inundação.

No Capítulo 3, é proposto o modelo de avaliação de risco sob uma visão multidimensional do risco, considerando dimensões de consequência humana, econômica e social. Ainda, desenvolve-se uma aplicação numérica do modelo proposto.

Por último, no Capítulo 4, serão apresentadas as conclusões, limitações e sugestões para futuros trabalhos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e revisão bibliográfica da pesquisa.

2.1 Fundamentação Teórica

A base conceitual utilizada para trabalho é apresentada a seguir e consiste em decisão multicritério, teoria da utilidade, teoria da decisão, mudanças climáticas e seus efeitos nos centros urbanos, inundações, gerenciamento de risco de inundações e sistemas de informações geográficas.

2.1.1 Decisão Multicritério

Um problema de decisão multicritério é caracterizado por uma situação onde há ao menos duas alternativas de ação para serem escolhidas e múltiplos objetivos envolvidos, muitas vezes conflitantes. Além disso, um problema de decisão multicritério também envolve a presença de um decisor, cujas preferências são utilizadas para obtenção da alternativa de ação que apresente o melhor compromisso entre os critérios (DE ALMEIDA, 2013).

Segundo DE ALMEIDA *et al*. (2012), além do decisor, vários outros atores podem ser considerados no processo decisório, tais como, o analista, o cliente e o especialista. Assim, o decisor está relacionado ao seu poder de escolher o que fazer no processo decisório, o analista fornece suporte metodológico ao processo, o cliente é um intermediador entre o analista e o decisor, e o especialista é aquele que conhece os mecanismos de comportamento do sistema objeto de estudo e do ambiente que influenciam varáveis relacionadas ao problema de decisão.

De acordo com De Almeida (2013), os métodos MCDA (*Multicriteria Decision Analysis*) podem ser classificados de diversas formas. Uma das classificações é segundo a natureza do conjunto de alternativas A, que pode ser:

a) Discreto, compreendendo os problemas de natureza gerencial;
b) Contínuo, englobando os métodos que usam programação matemática.

Roy (1996), Vincke (1992) e Pardalos *et al*. (1995) classificam os MCDA em três conjuntos:

a) Métodos de critério único de síntese: apresentam a ideia de agregação compensatória, eliminando qualquer incomparabilidade, sendo baseados no Modelo Aditivo Determinístico e na Teoria da Utilidade (KEENEY; RAIFFA, 1976);

b) Métodos de sobreclassificação, prevalência, superação e síntese (*outranking*): apresentam avaliações não compensatórias, assumindo a possibilidade de incomparabilidade e fundamentam-se na comparação par a par entre as alternativas. Destacam-se a família dos métodos ELECTRE e PROMETHEE;
c) Métodos interativos: abrangem problemas discretos ou contínuos, sendo representados pelos métodos PLMO (Programação Linear Multiobjetivo).

Segundo De Almeida (2013), uma classificação que merece destaque para os métodos multicritérios é:

a) Compensatórios, quando prevalecem à ideia de *tradeoff* entre os critérios, isto é, a compensação de um pior desempenho de uma ação em certo critério por um melhor desempenho em outro critério;
b) Não compensatórios, quando não há *tradeoff* entre os critérios, isto é, os valores das alternativas nos critérios não podem interagir entre si.

Nas abordagens compensatórias, a interpretação dos pesos é diferente das abordagens não-compensatórias. No primeiro caso, os "pesos" são chamados de constantes de escala, onde eles equivalem a taxas de substituição, assim, eles não caracterizam a importância intrínseca relativa dos atributos. Já no segundo caso, a interpretação dos pesos é simplesmente uma medida da importância relativa dos atributos envolvidos (ROGERS; BRUEN, 1998).

Diversos estudos ao longo das décadas permitiram grandes avanços em problemas de modelagem, usando métodos de agregação multicritério, levando pesquisadores a aplicarem os mesmo em diversas áreas do conhecimento, tais como: construção civil (Zolfani *et al.*, 2018), gerenciamento de risco (Da Silva *et al*., 2018), setor econômico (Ferreira *et al*., 2018), setor elétrico (Aryanpur *et al*., 2019), entre outras aplicações.

Particularmente, no que se refere a aplicações de MCDM a problemas relacionados a inundações, De Brito e Evers (2016) pontuam que há crescente interesse nesse sentido, o que destaca a utilidade do MCDM como uma ferramenta de apoio à decisão em todas as etapas do processo de gerenciamento de inundações.

Nesse contexto, Levy (2005) afirma que abordagens MCDM podem ajudar os tomadores de decisão em um problema de gerenciamento de inundações a formular seus valores e preferências, quantificar essas prioridades e aplicá-las a um contexto de decisão específico.

É importante também considerar que na literatura encontram-se vários procedimentos para a construção de um modelo de decisão multicritério. Como por exemplo, o framework De

Almeida (2013) que consiste em três fases principais para guiar no processo de formulação de um problema de decisão.

Neste estudo, é utilizada uma metodologia multicritério compensatória baseada em MAUT (*Multi-Attribute Utility Theory*), que será mais bem detalhada na próxima seção.

2.1.1.1 Teoria da Utilidade Multiatributo

A Teoria da Utilidade, de von Neumann e Morgenstern, é uma representação das preferências relativas de um indivíduo entre os elementos de um conjunto, incorporando ao problema as escolhas do decisor e seu comportamento em relação ao risco (KEENEY, RAIFFA e W.RAJALA, 1979).

Tendo em vista a Teoria da Utilidade e a Teoria da Decisão, surgiu a Teoria da Utilidade Multiatributo (*Multi-Attribute Theory* - MAUT) (KEENEY; RAIFFA, 1976). MAUT incorpora à Teoria da Utilidade os elementos necessários para resolver problemas com múltiplos critérios, mantendo a estrutura axiomática da teoria (DE ALMEIDA, 2013).

Nesse contexto, modelos de decisão que utilizam MAUT muitas vezes incluem a abordagem da Teoria da Decisão, que em seu enfoque Bayesiano permite lidar com incertezas relativas aos problemas a serem analisados através do uso de conhecimento a priori de especialistas. Portanto, as incertezas sobre o estado da natureza (θ), podem ser obtidas de especialistas, na forma das probabilidades a priori $\pi(\theta)$ (DE ALMEIDA *et al*., 2015). Para cada θ_i escolhido pela natureza e para cada ação (alternativa) a_i escolhida pelo tomador de decisão, a consequência c pode ser obtida, de acordo com a função consequência (Berger, 1985) $P(c \mid \theta, a)$.

Nessa perspectiva, considerando-se uma modelagem probabilística, De Almeida *et al*. (2013) destacam que o modo como as incertezas são inseridas dentro da estrutura axiomática possibilita uma abordagem muito mais consistente com a aplicação do MAUT a problemas multicritério de decisão sob situação de incerteza.

Keeney & Raiffa (1976) apontam que usando o MAUT, existem procedimentos de elicitação muito bem estruturados para obter as constantes de escala para agregação das funções de utilidade dos critérios. Nesse sentido, o procedimento de elicitação da função utilidade multiatributo pode ser resumido em cinco etapas principais:

1. Introdução da terminologia e da ideia;
2. Identificação de independência;
3. Avaliação das funções de utilidade condicional;

4. Avaliação das constantes de escala;
5. Verificação de consistência dos resultados encontrados.

Os detalhes do processo de avaliação da função de utilidade multiatributo podem ser encontrados em Keeney & Raiffa (1976).

De acordo com De Almeida e Ramos (2002), o problema básico consiste em como estruturar e quantificar uma função utilidade u, ou seja, uma função f, tal qual apresentado na Equação (2.1):

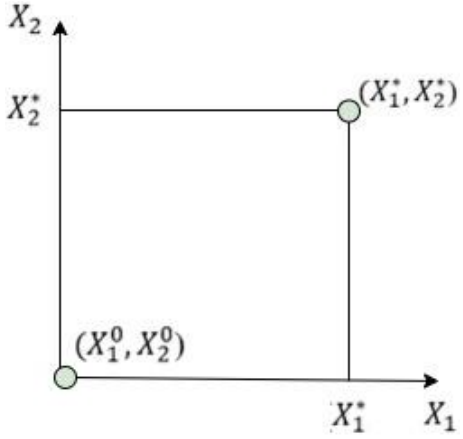
$$u(x_{1,}x_{2,}\dots,x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)] \quad (2.1)$$

Onde u_i corresponde a uma função utilidade sobre o atributo x_i.

Portanto, ao aplicar MAUT, o modelo final consiste em uma função de utilidade multiatributo a ser maximizado pela escolha de uma alternativa probabilisticamente associada às consequências (x_1, x_2, ..., x_n). Isso corresponde à função de utilidade esperada para as consequências em consideração (DE ALMEIDA, 2015).

O espaço de consequências pode ser ilustrado conforme Figura 2.1 (a título de exemplo, será apresentado para o caso de dois atributos X_1 *e* X_2, podendo ser aplicado da mesma forma para mais de dois atributos). Os valores X_1^* e X_2^* correspondem aos valores mais desejáveis para cada atributo, isto é, $u(X_1^*, X_2^*) = 1$, ao passo que os valores de X_1^0 e X_2^0 correspondem aos valores menos desejáveis, $u(X_1^0, X_2^0) = 0$ (conforme Figura 2.1).

Figura 2.1 - Espaço de consequências para dois atributos



Fonte: Adaptado de Keeney e Raiffa (1976).

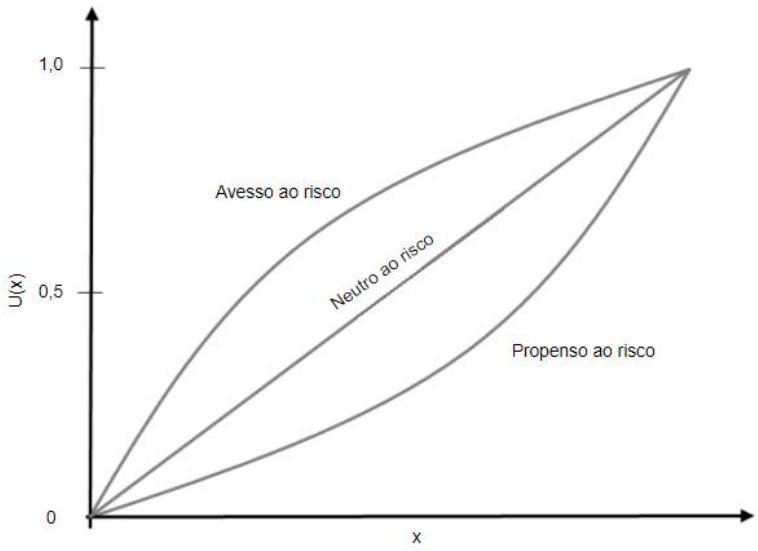
Na Teoria da Utilidade, pode-se evitar inconsistências por parte do decisor na estruturação do problema a partir da obediência aos axiomas da teoria (DE ALMEIDA, 2013). Assim, considerando-se relações de preferência (P) e indiferença (I), os axiomas são:

a) Ordenabilidade: dadas as consequências A e B, pode-se dizer que A P B (A é preferível a B, ou A I B (A é indiferente a B) ou B P A.
b) Transitividade: para preferência, se A P B e B P C, então A P C; para indiferença, se A I B e B I C, então A I C.
c) Dominância: se A P B, então existe p, $0 \leq p \leq 1$, tal que para qualquer C: [A, p; C, 1-p]; válido também para indiferença no lugar de preferência;
d) Arquimediano: se A P B P C, então existem p e q, $0 < q < p < 1$, tal que [A, p; C, 1-p] P B P [A, q; C, 1-q].

O modelo de utilidade esperada de von Neumann-Morgenstern também pode ser utilizado para caracterizar uma atitude de risco de um indivíduo, isto é, resulta-se na adoção de risco sob forma de loterias simples (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Nesse sentido, se a função utilidade do indivíduo é côncava ($u[E(\tilde{x})] > E[u(\tilde{x})]$), então o decisor é avesso ao risco; se é linear ($u[E(\tilde{x})] = E[u(\tilde{x})]$), então ele é neutro ao risco; caso seja convexa ($u[E(\tilde{x})] < E[u(\tilde{x})]$), então o indivíduo é propenso ao risco (ver Figura 2.2).

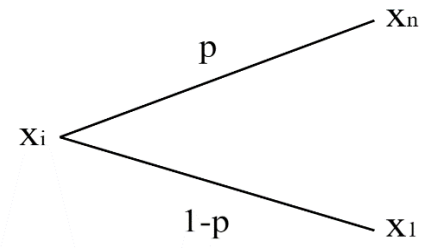
Figura 2.2 - Comportamento do decisor com relação ao risco



Fonte: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976).

A loteria $[X_n, p, X_1, (1-p)]$, permite ao decisor determinar as consequências de maior ou menor preferência com determinada probabilidade p por uma consequência certa X_i chamada de opção de certeza ou "equivalente certo", assim, o tomador de decisão ficará indeciso entre as consequências e a loteria (ver figura 2.3).

Figura 2.3 - Representação gráfica de uma loteria $x_i \sim [x_n, p, x_1, (1-p)]$



Fonte: Adaptado de De Almeida (2013).

Na estrutura de preferência do decisor, as características de independência em preferência podem existir. Nesse sentido, um atributo X_i é dito independente em utilidade dos demais atributos se as preferências sobre as loterias em diferentes níveis de X_i não dependam de um nível fixo nos atributos restantes. Os atributos $X_1, X_2, \ldots, X_n$ são mutualmente independentes em utilidade se todos os subconjuntos desses atributos são independentes em utilidade de seus subconjuntos complementares.

Nesse sentido, as condições de independência preferencial devem ser realizadas para obtenção da função utilidade multiatributo. Dado isso, são identificadas a independência em utilidade e a independência aditiva. Se a condição de independência aditiva entre X_1 e X_2 for atendida, então existe mútua independência em utilidade entre X_1 e X_2. Contudo, o contrário pode não ser verdadeiro, uma vez que se houver mútua independência em utilidade entre X_1 e X_2, não se pode afirmar que haja independência aditiva (DE ALMEIDA, 2013).

Sob essa perspectiva, a utilidade multiatributo na forma aditiva pode ser expressada, se somente se, os atributos $X_1, X_2, \ldots X_n$ são mutualmente independentes em utilidades e é constatada a independência aditiva entre os atributos (ver Equação 2.2):

$$u = \sum_{i=1}^{n} k_i u_i\,(x_i), \text{ onde } k_i \geq 1. \qquad (2.2)$$

onde u_i são funções utilidades unidimensionais [0,1] e k_i são as constantes de escala que indicam o valor do *tradeoff*. A soma dos k_i precisa ser igual a "1".

De acordo com Keeney & Raiffa (1976), as constantes de escala correspondem à utilidade do ponto na qual se tem a melhor condição para um atributo e a pior no restante. De Almeida (2011, 2013) destaca que é comum o equívoco de determinar os valores de constantes de escala como grau de importância dos atributos. Na verdade, as constantes de escala estão associadas à taxa de substituição, que traduz a ideia de compensação de ganho de um critério quando se perde em outro. Deste modo, as constantes de escala dependem diretamente da faixa de valores considerados no espaço de consequência.

Nesse sentido, os procedimentos de *tradeoff* dos valores de consequências são uma maneira de estimar as constantes de escala (KEENEY & RAIFFA, 1976).

No presente trabalho, a metodologia utilizada é o MAUT, visto que, como mencionado, apresenta um protocolo bem estruturado, apoiado por uma estrutura axiomática muito sólida e consistente para decisões que envolvem múltiplos critérios e incertezas.

2.1.2 Teoria da Decisão

A teoria da decisão é uma ferramenta de apoio a tomada de decisão que considera o fato de uma decisão ser uma consequência lógica do que se quer, do que se sabe e do que se pode fazer. Essa teoria permite a tomada de decisões racionais em situações de incerteza (SOUZA, 2005).

Como mencionado anteriormente, fatores básicos tratados pela teoria da decisão são encontrados no MAUT, sendo eles: os estados da natureza (θ) que representam variáveis não controladas pelo decisor, as alternativas (ações) que o decisor pode adotar (a), as consequências (c) que podem ser estimadas por meio das funções probabilidade da consequência.

De acordo com De Almeida (2011, 2013), a teoria da decisão trata das incertezas inerentes aos problemas a serem analisar por meio do uso de conhecimento a priori de especialistas. Segundo Martz e Waller (1982), a experiência adquirida por um especialista sobre a variável θ pode ser usada na forma de uma distribuição de probabilidade ($\pi_a(\theta)$), que está associada a descrição do conhecimento a priori do especialista sobre o estado da natureza representado pela variável analisada.

Nesse sentido, a elicitação do conhecimento a priori visa resgatar as principais características da opinião do especialista, através da integração da sua experiência e seu conhecimento da literatura sobre o assunto analisado (KADANE; WOLFSON, 1998).

Diante dessa perspectiva, a teoria da decisão compreende os seguintes pontos (BERGER, 1985; SOUZA, 2005): análise das informações passadas e presentes do sistema em estudo, se baseando nas informações objetivas e/ou subjetivas disponíveis, elicitação das distribuições de probabilidade que modelem as incertezas, construção de um modelo matemático que descreva o sistema, elicitação de preferências e valores dos decisores em relação a problemática; identificação ou concepção das alternativas de ação que direcionam aos objetivos desejados, combinação lógica matemática das alternativas de ação, das utilidades, bem como das probabilidades com o modelo matemático do sistema, visando identificar para o decisor o melhor curso de ação, execução da ação optada na etapa anterior, reiteração ao primeiro passo

e reinício do processo para correção de erros e distorções quanto aos dados, probabilidades, utilidades e alternativas de ação.

De acordo com Berger (1985), pela teoria da decisão a função perda pode ser definida como o negativo da função utilidade da consequência esperada, sendo expressa por:

$$\mathrm{L(c)} = -\int_c P(c|\theta, a_i)u(c)dc \quad (2.3)$$

Portanto, a função perda é obtida a partir da função utilidade que mede numa escala cardinal as preferências que o decisor tem (DE ALMEIDA; DE SOUZA, 2001).

As consequências podem ser consideradas como resultado de uma dada dimensão de impacto, que podem ser estimadas através de uma função distribuição de probabilidade $P(c|\theta, a)$, tal que θ são os cenários de perigo (estados da natureza), c é a consequência e a é a ação (alternativa).

Para Keeney e Raiffa (1976), no tocante a função utilidade, esta é determinada em uma escala intervalar entre os extremos [0;1], de modo que o valor "0" está relacionado a "menos preferida" consequência e o valor "1" está relacionada a "mais preferida" consequência, isto é, sem danos, sendo estimada de acordo com o domínio das consequências.

Portanto, a função utilidade pode ser calculada por:

$$u(\theta, a_i) = \int_c P(c|\theta, a_i)u(c)dc \quad (2.4)$$

Possuindo o conhecimento sobre a distribuição de probabilidade a priori dos estados da natureza ($\pi_{a_i}(\theta)$), pode-se obter o risco associado a cada alternativa (a_i), dado por:

$$r(a_i) = \sum_\theta \pi(\theta, a_i)L_\theta(a_i) \quad (2.5)$$

Assim, o conceito de risco baseado na Teoria da Decisão, avalia as consequências dos cenários de perigo, e combina ambas as incertezas associadas com: as consequências ($P(c|\theta, a_i)$), e os cenários de perigos ($\pi_{a_i}(\theta)$).

2.1.3 Mudanças climáticas e seus efeitos nos centros urbanos

As mudanças climáticas se intensificaram durante o processo de migração de pessoas para as áreas urbanas (DA SILVA *et al*., 2018). Estudos recentes apontam que mais pessoas vivem em áreas urbanas do que em áreas rurais, com 55% da população mundial residindo em áreas

urbanas em 2018. Em 1950, 30% da população mundial era urbana, já em 2050, é esperado que 68% das pessoas vivam em áreas urbanas (UNITED NATIONS, 2018).

A interação crescente entre o homem e seus recursos naturais levou suas ações a terem um impacto considerável sobre o meio ambiente e, assim, contribuíram para as mudanças climáticas (DA SILVA *et al*., 2018).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) afirma com um nível muito alto de confiança que, nas áreas urbanas, as mudanças climáticas são projetadas para aumentar os riscos para pessoas, ativos, economias e ecossistemas, incluindo os riscos de precipitação extrema.

Nesse sentido, os impactos das mudanças climáticas são cada vez mais considerados no gerenciamento de inundações, juntamente com outros fatores como mudanças na cobertura do solo e aumento da demanda de água (QUEVAUVILLER, 2011).

Muitos estudos têm se concentrado na avaliação dos impactos das tendências futuras do uso da terra e das mudanças climáticas em diferentes escalas no gerenciamento de riscos de inundação (FEYEN *et al*., 2012; KLIJN *et al*., 2012; ALFIERI; FEYEN; DI BALDASSARRE, 2016).

Diante dos efeitos das mudanças climáticas em áreas urbanas, o papel dos governantes é crítico no gerenciamento de risco para o combate aos desastres naturais relacionados às mudanças climáticas, sendo essencial a tomada de decisões apropriadas e estruturadas para prevenir e mitigar as inundações (DA SILVA *et al*., 2019).

2.1.4 Inundações

No glossário do relatório IPCC (2012), as inundações são definidas como: O transbordamento dos limites normais de uma corrente ou outro corpo de água ou o acúmulo de água em áreas que normalmente não estão submersas. As inundações incluem inundações de rios (fluviais), inundações repentinas, inundações urbanas, inundações pluviais, inundações de esgoto, inundações costeiras e inundações de lagos glaciais.

Segundo o FLOODsite (2009), diferentes tipos de inundações podem ser reconhecidos com base na:

a) Origem da água: pode-se diferenciar entre a água do mar (inundações costeiras), dos rios (inundações fluviais), de cima (inundações pluviais) ou de baixo (inundações de águas subterrâneas e transbordamento de esgoto).

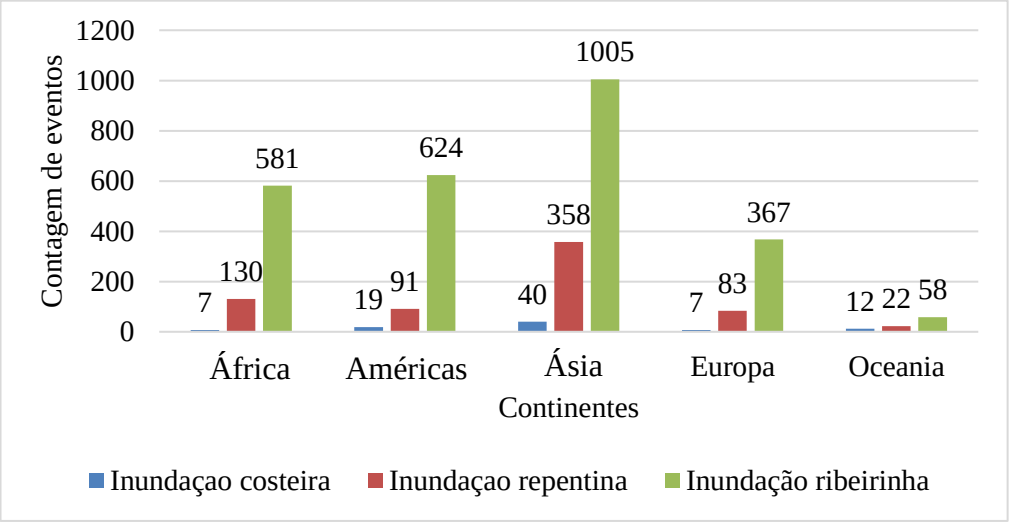
b) Geografia da área receptora: pode-se diferenciar quando o mar invade a terra (inundações costeiras e estuarinas), quando os rios transbordam em suas margens (inundações fluviais) ou quando a capacidade de drenagem é insuficiente para levar a água da chuva para longe com rapidez suficiente (inundação regional de bacias hidrográficas ou áreas urbanas).

c) Causa: resultado de excesso de chuvas (interior), tempestades (costeiras), terremotos (tsunamis) e inundações resultantes de rompimento de barragens (induzidas pelo homem).

d) Velocidade de início: pode-se distinguir entre as inundações caracterizados pela alta velocidade da água de inundação (inundações repentinas) e entre as inundações caracterizados pela baixa velocidade da água de inundação.

Sob essa perspectiva, as inundações nos rios representam o desastre natural mais frequente entre 1900 e 2019, de acordo com dados obtidos através do banco de dados de desastres internacionais (CRED, 2019). A Figura 2.4 apresenta o número de eventos por tipo de inundação e continente nesse período.

Figura 2.4 - Número de eventos por tipo de inundação e continente entre 1900 e 2019



Fonte: Adaptado de EM-DAT/CRED (2019).

Pode-se observar na Figura 2.4 que a Ásia apresentou o maior número de eventos no período analisado, seguido das Américas, sendo um aspecto comum a todos os continentes a predominância de inundações do tipo ribeirinha.

Segundo Rincón, Khan e Armenakis (2018), as inundações nos rios são responsáveis por produzir significativos impactos sociais, econômicos e ambientais, como por exemplo,

perda de vidas humanas e efeitos negativos na população, danos à infraestrutura e serviços essenciais, danos às lavouras e aos animais, disseminação de doenças e contaminação do suprimento de água.

Nesse sentido, estudos recentes publicados pelo Centro de Pesquisas sobre Epidemiologia de Desastres (CRED) revelam que as inundações são o tipo de desastre natural que afetam o maior número de pessoas, em mais dois bilhões entre 1998 e 2017 e também são responsáveis por 11% das mortes relacionadas a esse tipo de desastre (WALLEMACQ; HOUSE, 2018).

No Brasil, de acordo com o banco de dados do EM-DAT, no período de 1948 a 2019, o número de ocorrências de inundações registrado corresponde a 138 eventos, resultando em 7.820 mortes, aproximadamente 9,5 bilhões em danos totais e mais de 20 milhões de pessoas afetadas, que inclui feridos, desabrigados e aqueles que precisam de assistência imediata após o evento, tais como comida e água (CRED, 2019).

Tendo isso em vista, De Moel *et al*. 2015 apontam que a gestão desse risco é importante, tanto da perspectiva social quanto econômica, a fim de reduzir danos e perdas e minimizar ou evitar o sofrimento humano.

2.1.5 Gerenciamento de risco de inundações

O conceito de risco pode ser encontrado na literatura de diversas maneiras, assim, algumas definições são baseadas em probabilidade, chance ou valores esperados, outras em eventos ou perigos indesejáveis e outras em incertezas, têm as que consideram o risco como subjetivo e epistêmico, dependente do conhecimento disponível, e também as que concedem ao risco um status ontológico independente dos avaliadores (AVEN, 2012).

No contexto de engenharia, os riscos também podem ser descritos de várias formas, de modo que para Aven (2011), a maioria das definições inclui três componentes: o que pode dar errado, ou seja, os eventos iniciais (A), as consequências desses eventos, se eles ocorrerem (C) e as probabilidades de A e C, tal que risco pode ser definido como: Risco = (A, C, P), podendo a probabilidade P ser interpretada como uma frequência relativa (fração relativa de vezes que o evento ocorre se a situação analisada for hipoteticamente repetida um número infinito de vezes) ou como uma medida subjetiva de incerteza, condicionada ao conhecimento de base (a perspectiva bayesiana).

Seguindo essa lógica, o risco de inundação pode ser definido de pelo menos duas maneiras, ou seja, como a probabilidade de ocorrência de inundação multiplicada por suas consequências potenciais ou em função do perigo de inundação, as características de exposição

e a vulnerabilidade do sistema socioeconômico exposto (SAMUELS; KLIJN; DIJKMAN, 2006; FLOODSITE 2009).

De acordo com o FLOODsite (2009), na primeira definição a probabilidade pode ser especificada, se referindo à probabilidade de inundação (o perigo), ou à probabilidade de exposição ou, finalmente, à probabilidade de consequências.

Já do ponto de vista de Merz *et al*. (2014), referente a segunda definição, o perigo representa a probabilidade e a intensidade das inundações; a exposição descreve os elementos em risco - por exemplo, as pessoas e seus ativos que podem ser afetados por inundações; e vulnerabilidade descreve a suscetibilidade ou propensão de elementos em risco a serem afetados adversamente.

Segundo Klijn *et al*. (2015), a primeira definição (probabilidade × consequência) é preferida entre cientistas naturais, isto é, que se dedicam ao estudo da natureza, e engenheiros, que geralmente buscam uma redução da probabilidade de inundação por meio da proteção contra inundações e, portanto, precisam ser capazes de calcular riscos. Já a segunda definição, é preferida pelos cientistas sociais e planejadores, que geralmente consideram o perigo como um planejamento espacial.

As consequências das inundações podem, em geral, ser classificadas em impactos diretos e indiretos (MERZ *et al*., 2010). As consequências diretas estão diretamente relacionadas à área e hora do evento de inundação, enquanto as indiretas são frequentemente associadas a consequências que ocorrem fora da área inundada ou após o evento de inundação. Ambos os tipos de impactos podem ser classificados em impactos tangíveis e intangíveis, assim, as consequências tangíveis referem-se a efeitos que podem ser monetizados e as consequências intangíveis referem-se a efeitos que são muito elusivos para quantificar ou mesmo monetizar (DE MOEL *et al*., 2015).

Alguns exemplos para os diferentes tipos de danos são (ver Tabela 2.1):

Tabela 2.1 - Diferentes tipos de danos causados pelas inundações

	Tangível	Intangível
Direto	- Residências - Ativos de capital e inventário - Interrupção de negócios (dentro da área inundada) - Veículos - Estradas, serviços públicos e infraestrutura de comunicação - Operações de evacuação e resgate - Reconstrução das defesas contra inundações - Custos de limpeza	- Fatalidades - Lesões - Inconveniência e danos morais - Históricos e perdas culturais - Perdas ambientais
Indireto	- Danos às empresas fora da área inundada - Ajustes na produção e padrões de consumo fora da área inundada - Alojamento temporário para pessoas evacuadas	- Perturbação social - Traumas psicológicos - Perda de confiança nas autoridades públicas

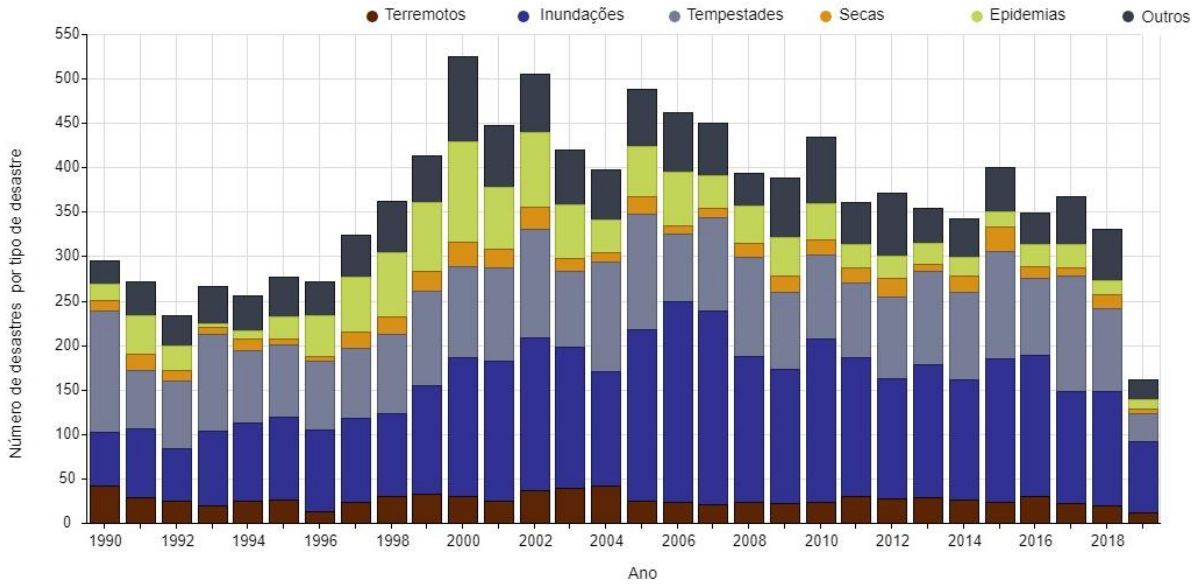
Fonte: Adaptado de Jonkman *et al* (2008).

A divisão do dano em direto e indireto, bem como em tangível e intangível é comum, mas as interpretações e delineamentos do que é considerado um impacto direto e indireto diferem (JONKMAN *et al*., 2008).

Conclui-se, portanto, que o conceito de risco de inundação é usado de maneiras ligeiramente diferentes, por diferentes pesquisadores, bem como a compreensão no que concerne à impactos diretos e indiretos. Entretanto, independente das ligeiras diferenças que possam existir, a importância do gerenciamento desse risco é cada vez mais evidente.

As estatísticas mostram que a frequência de eventos hidrológicos, dos quais as inundações são predominantes, cresceu dramaticamente (MUNICH RE, 2017). O histograma de tendência dos desastres naturais do período de 1990 a 2019, obtido através do EM-DAT (2019) é apresentado na Figura 2.5. Observa-se, em especial, a tendência dos eventos de inundações, sendo notório que esse tipo de desastre é o mais comum.

Figura 2.5 - Tendência dos desastres naturais no mundo



Fonte: Adaptado de EM-DAT/CRED (2019).

Sob essa ótica, a necessidade de aprimoramento de métodos e técnicas de gerenciamento de risco ganha ainda mais importância quando se analisa a tendência dos desastres naturais no mundo e seus impactos em escala global.

Perante isto, o gerenciamento do risco de inundação possui um papel fundamental na implementação de estratégias para prevenir e mitigar as inundações por meio de decisões adequadas pelo governo (HUMBERTO *et al.*, 2019).

O gerenciamento de riscos de inundação combina resultados, informações e recomendações das práticas de análise e avaliação de riscos, que são usadas como informações essenciais para a definição e priorização de medidas de redução de riscos (CASTILLO-RODRÍGUEZ *et al*., 2014).

Nesse processo, todos os agentes envolvidos (por exemplo, projetistas, operadores, autoridades, partes interessadas, etc.) devem promover e alcançar uma visão integrada e ampla do gerenciamento de riscos em direção a uma boa governança de riscos de inundação, levando em consideração o contexto, os objetivos e as restrições inerente ao processo de gerenciamento de riscos de inundação (SPANCOLD, 2012).

Sob essa visão, Castillo-Rodríguez *et al*. (2014) destacam que a governança de riscos de inundação deve abranger, por exemplo, aspectos técnicos, sociais, culturais, econômicos, entre outros, relacionados ao desenvolvimento, priorização e aplicação de ações de mitigação de riscos para deve ser realizada antes, durante e após um evento de desastre de inundação.

Sayers *et al*. (2015) alegam que abordagens de gerenciamento de inundações se desenvolveram em todo o mundo e, continuam a evoluir, em resposta a eventos de inundações, mudança de prioridades, aumento da complexidade da sociedade e demandas impostas ao gerente de inundações.

Esse processo de gerenciamento de risco de inundação é contínuo, caracterizado por atividades repetidas, tais como, análise do risco de inundação, consideração de medidas e instrumentos de política para reduzir o risco, tomada de decisões políticas, implementação de medidas e instrumentos, monitoramento de seus efeitos, entre outros (FLOODSITE, 2009).

Schröter *et al*. (2014) ressaltam que o gerenciamento de inundações é complexo e multifacetado, afetado por diferentes fatores. Para executar uma tarefa tão complexa, técnicas de tomada de decisões multicritério (MCDM) têm sido usadas, fornecendo aos tomadores de decisão uma estrutura sistemática para lidar com esses problemas (AHMADISHARAF; KALYANAPU; CHUNG, 2017).

Sob essa perspectiva, pesquisadores, tomadores de decisão e profissionais fora da comunidade científica têm dado muita atenção na resolução de tais problemas com o uso de técnicas MCDM. Esse fato foi constatado através de uma revisão da literatura que teve o objetivo de identificar artigos que aplicam o MCDM a problemas relacionados à inundação, sendo possível concluir que o *Analytical Hierarchy Process* (AHP) é a ferramenta MCDM mais aplicada, seguido do *Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution* (TOPSIS), ao contrário do MAUT que tem sido negligenciado (DE BRITO e EVERS, 2016). O uso do termo negligenciado pelos autores é muito apropriado, visto que o MAUT é mais adequado a estudos de contextos probabilísticos envolvendo risco, embora seja percebido como uma abordagem de maior complexidade. De uma forma geral, tem se notado o uso de métodos mais fáceis, embora inadequados.

Em face do exposto, percebe-se a importância do gerenciamento do risco de inundações, que pode ainda obter vantagens através do uso integrado de sistema de informações geográficas (SIG) e de metodologias MCDM/A (TANG *et al*., 2018).

2.1.6 Sistemas de Informações Geográficas (SIG)

Um sistema de informação geográfica (SIG), também conhecido como GIS (do inglês - *Geographic Information System*), é um sistema de informações baseado em computador que suporta captura, modelagem, manipulação, recuperação, análise e apresentação de dados espaciais (JOHNSON, 2009).

Segundo Kennedy (2013), as capacidades do SIG são tão abundantes quanto seus usos, de modo que uma descrição curta e significativa é impossível, contudo, ele aponta que a definição que pode ser encontrada em um dicionário é que um SIG é uma coleção organizada de hardware e software de computador, pessoas, dinheiro e infraestrutura organizacional que possibilita a aquisição e o armazenamento de dados geográficos e de atributos relacionados, para fins de recuperação, análise, síntese e exibição, a fim de promover a compreensão e auxiliar na tomada de decisão.

Tendo em vista que os SIG podem processar dados espaciais, Meyer, Scheuer e Haase (2009) apontam que esta é uma ferramenta benéfica para lidar com dados espaciais sobre riscos de inundação (MEYER; SCHEUER; HAASE, 2009).

O SIG fornece mapas de inundação que são um elemento crucial do gerenciamento de risco de inundação (GIGOVIĆ *et al*., 2017). Ele é capaz de modelar de forma integrada as condições naturais, incluindo clima, topografia, hidrologia e outras características sociais e econômicas (CHEN e*t a*l., 2015).

Para Johnson (2009), olhar um mapa fornece conhecimento de onde as coisas estão, o que são e como elas se relacionam. Nesse sentido, Rincón, Khan e Armenakis (2018) afirmam que o mapeamento do risco de inundação com base no SIG e na análise de vários critérios é uma ferramenta valiosa para estimar as áreas de risco de inundação e ajudar os planejadores de recursos hídricos e os responsáveis pelas decisões a se concentrarem em áreas específicas, a fim de realizar uma avaliação mais detalhada do risco de inundação.

Sob essa perspectiva, Luu e Von Meding (2018) afirmam que a incorporação da avaliação de risco de inundação em uma estrutura SIG tem sido aplicada em muitos estudos recentes, tanto em escala global, como regional e local.

Chen, Yu e Khan (2010) afirmam que existe um interesse crescente em incorporar SIG a técnicas de MCDM devido às capacidades do SIG em lidar com uma ampla gama de dados de critérios de diferentes fontes. Segundo Qi, Qi e Altinakar (2013), a tomada de decisão convencional em gestão de inundações não leva em consideração a variabilidade espacial dos critérios de avaliação.

A aplicação de técnicas de MCDM em problemas da vida real aumentou nos últimos anos, assim a necessidade de construir modelos de decisão avançados, com alta capacidade de suporte a tomada de decisões em uma ampla gama de aplicações, promove a integração de técnicas de MCDM com sistemas aplicáveis, incluindo sistemas de informações geográficas (JOZAGHI *et al*., 2018).

A combinação dos recursos SIG e MCDM é de grande importância na análise espacial multicritério. Por um lado, os SIG fornecem os recursos de aquisição, armazenamento, recuperação, manipulação e análise de dados para obter informações para a tomada de decisões, apresentando, contudo, capacidade limitada no que diz respeito à análise da estrutura de valor. Por outro lado, as técnicas do MCDM fornecem as ferramentas para agregar dados geográficos e as preferências do tomador de decisão em valor unidimensional ou utilidade de decisões alternativas (MALCZEWSKI, 1998).

O MCDM baseado em SIG envolve um conjunto de unidades básicas definidas geograficamente e um conjunto de critérios de avaliação representados como atributos ou camadas do mapa. Com base em um esquema de classificação específico, informa uma decisão espacialmente complexa sobrepondo os mapas de critérios de acordo com os valores de atributo e as preferências do tomador de decisão usando um conjunto de pesos (CHEN; YU; KHAN, 2010).

Segundo Chang, Parvathinathan e Breeden (2008), uma das desvantagens da avaliação de inundações do SIG-MCDA é que a seleção de áreas de risco de inundação depende de alguma forma do julgamento de especialistas e pode ser sensível aos pesos dos fatores de decisão dos critérios.

Rincón, Khan e Armenakis (2018) esclarecem que algumas das limitações de estudos que usam a abordagem de risco de inundação com vários critérios baseados em SIG incluem métodos de ponderação de critérios que não são apropriados ou, em alguns casos, não são utilizados. Além disso, o uso de critérios mais complexos ou o uso de critérios muito simples pode levar a mapas não confiáveis de risco de inundação.

O modelo proposto busca inserir em sua análise recursos de geoprocessamento como ferramenta complementar para contribuir com o processo decisório. Nesse sentido, a principal diferença entre o estudo atual e outras pesquisas de inundação que utilizam técnicas MCDM e SIG é que o modelo proposto neste estudo fornece ao decisor uma medida de risco multidimensional, sob a visão da teoria da decisão, que forma um ordenamento em hierarquia de risco das zonas analisadas, sendo esta informação utilizada como *input* para o sistema de informação geográfica, visando contribuir assim para processo decisório e consequentemente para o processo de gerenciamento de risco de inundações.

2.2 Revisão da Literatura

Esta seção apresenta a revisão bibliográfica referente a aspectos relacionados ao uso de métodos MCDM/A no contexto de gerenciamento de risco de inundações e a integração de técnicas MCDM/A e SIG.

2.2.1 Uso de métodos MCDM/A no gerenciamento de risco de inundações

Os métodos MCDM/A têm sido utilizados em muitos contextos de gerenciamento de risco. De Almeida *et al*. (2017), realizaram uma revisão sistemática da literatura onde identificaram tendências de pesquisa ao lidar com modelos multicritérios aplicados no gerenciamento de riscos.

Nesse contexto, técnicas de MCDM são utilizadas para aplicações em diferentes áreas relacionadas ao gerenciamento de inundações, como por exemplo, para o ranqueamento de alternativas para mitigação de inundações (Brouwer e Van Ek, 2004; Chitsaz e Banihabib, 2015; Mostafazadeh *et al.* 2017), avaliação de risco, vulnerabilidade e perigo simultaneamente (Zou *et a*l. 2013; Li e Wu, 2018), capacidade de enfrentamento (Scheuer, Haase e Meyer, 2011; Haase, 2013; De Brito, Evers e Höllermann, 2017), controle de inundação de reservatório (Zhu *et al*. 2017; Zhu, Zhong e Sun, 2018), gerenciamento de emergência (Zhang *et al*., 2016).

Ainda nesse sentido, são encontrados estudos que aplicam técnicas de MCDM em diferentes categorias, como no mapeamento de risco de inundação (Sinha et al. 2008; Meyer, Scheuer e Haase, 2009; Fernández e Lutz, 2010; Chen, Yeh e Yu, 2011; Kourgialas e Karatzas, 2011; Zou et al. 2013; Stefanidis e Stathis, 2013, Radmehr e Araghinejad, 2014, Lee, Jun e Chung, 2014), quantificação da vulnerabilidade ao risco de inundação (Jun *et al*. 2013; Lee, Jun e Chung, 2015), avaliação dos parâmetros de risco de inundação mais importantes (Dang, Babel e Luong, 2011)).

De Brito e Evers (2016) apresentam em seu estudo uma revisão sistemática de artigos que aplicam MCDM/A a problemas relacionados a inundações. O estudo revela que os métodos clássicos do MCDM, como MAUT, foram negligenciados, tendo sido aplicado em menos de 5% dos estudos observados. Por outro lado, quase metade dos artigos analisados utilizaram o AHP para obter os pesos dos critérios, por ser considerado um método relativamente fácil e flexível, exigindo menos habilidades do que outras ferramentas.

A abordagem MAUT tem sido utilizada no contexto das inundações, como por exemplo, para o mapeamento de risco de inundação (Meyer *et al*., 2007, 2009; Kubal *et al*., 2009), decisão

de evacuação (Kailiponi, 2010), alternativas de adaptação (Loos e Rogers, 2016), avaliação de vulnerabilidade de pontes (Liu *et al*. 2018)).

Existem várias abordagens que sugerem procedimentos multicritérios para avaliar, mapear e gerenciar a dimensão econômica, social e ambiental do risco de inundação de maneira integrada (Brouwer e Van Ek, 2004; Meyer, Scheuer e Haase, 2009; Scheuer, Haase e Meyer, 2011; Ahmadisharaf, Kalyanapu e Chung, 2017, Da Silva *et al*. 2018; Liu *et al.* 2018; Da Silva *et al*, 2019)).

A integração de outras dimensões têm sido abordadas em estudos voltados para o problema das inundações, como por exemplo, Bana e Costa, Da Silva e Correia (2004) consideraram as dimensões ambiental, social e técnica em seu trabalho. Humberto *et al*. (2019), propuseram uma modelagem multicritério para combater os riscos de inundações em áreas urbanas, considerando dimensões de consequência humana, social e financeira. Moghadas *et al*. (2019), realizaram uma avaliação da resiliência urbana a inundações considerando as dimensões social, econômico, institucional, infraestrutura, capital comunitário e ambiental.

Portanto, pode-se encontrar na literatura uma ampla gama de estudos voltados para gerenciamento de risco de inundação fazendo a utilização técnicas MCDM, sendo esta uma demonstração de que há interesse dos pesquisadores em resolver problemas relacionados as inundações com o uso de técnicas de tomada de decisão multicritério.

O presente estudo tem como diferencial a proposição de modelo multicritério de avaliação de risco, baseado na teoria da decisão e teoria da utilidade multiatributo (MAUT), tendo como objetivo a sua utilização como uma ferramenta de tomada de decisão, que pode auxiliar o gerenciamento de risco de inundações em áreas urbanas.

2.2.2 Integração de técnicas MCDM e SIG no contexto de risco de inundação

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são ferramentas úteis, pois gerenciam grande quantidade de dados envolvidos na análise de decisão com vários critérios (FERNÁNDEZ; LUTZ, 2010).

A combinação de SIG com MCDM tem sido usada por alguns pesquisadores na análise de desastres naturais (KARLSSON *et al.;* 2017; PALCHAUDHUR; BISWAS, 2016; NYIMBILI; ERDEN, 2018; ARABAMERI *et al.*, 2019b).

A incorporação da avaliação de risco de inundação em uma estrutura SIG tem sido aplicada em escalas global, regional e local em muitos estudos recentes (LUU; VON MEDING, 2018).

Malczewski (2006) realizou uma revisão de literatura e encontrou 319 artigos SIG-MCDA publicados entre 1990 e 2004, contemplando uma grande variedade de aplicações e problemas de decisão, como por exemplo, na área de desastres naturais, foram identificados estudos para problemas de decisão como adequação da terra e avaliação do cenário.

Muitos estudos aplicam técnicas de MCDM e SIG em diferentes categorias de gerenciamento de inundações, como o zoneamento de risco de inundação (Kourgialas e Karatzas, 2011; Stefanidis e Stathis, 2013; Radmehr e Araghinejad, 2014), mapeamento de risco de inundação (Sinha *et al*. 2008; Meyer, Scheuer e Haase, 2009), avaliação de risco de inundação (Lee, Jun e Chung, 2015), análise de vulnerabilidade a inundações (Radmehr e Araghinejad, 2015), priorização de estratégias de mitigação de inundações (Bana e Costa; Da Silva; Correia, 2004; Chitsaz e Banihabib, 2015), avaliação integrada de cenários de gerenciamento de inundações a longo prazo (Brouwer e Van Ek, 2004), seleção de locais de medidas de mitigação de inundações (Ahmadisharaf, Tajrishy e Alamdari, 2016; Ahmadisharaf *et al*. 2015b).

A diversidade de aplicações nesses estudos é ampla, como por exemplo, para seleção de locais de barragens (Jozaghi *et al*. 2018), seleção do local das bacias de detenção (Ahmadisharaf, Tajrishy e Alamdari, 2016), seleção de áreas mais adequadas para recarga artificial de águas subterrâneas (Nasiri *et al.* 2013), identificação de possíveis zonas de risco de inundação (Fernández e Lutz, 2010; Rahmati, Zeinivand e Besharat, 2016; Souissi *et al.* 2019; Arabameri *et al.* 2019a), seleção de alternativas de gestão de inundações (Ahmadisharaf, Kalyanapu e Chung, 2016; Ahmadisharaf; Kalyanapu; Chung, 2015), entre outros.

Fernández e Lutz (2010) desenvolveram um zoneamento de risco de inundação urbana auxiliado por SIG em duas cidades com aplicação de análise de decisão multicritério, identificando através do mapa gerado que os bairros localizados perto dos principais sistemas de descarga que estão em perigo.

Lin, Wu e Liang, (2019) propuseram um framework SIG-MCDM para prever a suscetibilidade das cidades às inundações pluviais e apontam que o uso dessas ferramentas é adequado para ambientes com poucos dados em que é difícil aplicar modelos hidráulicos e métodos de aprendizado de máquina.

A principal diferença entre o presente estudo e os demais trabalhos voltados para problemas de inundação que combinam SIG e MCDM é que neste estudo, é proposto um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para a análise de riscos de inundação em áreas urbanas, considerando dimensões de consequências humana,

econômica e social, no qual as medidas de risco formam uma hierarquia decrescente de risco das alternativas consideradas, sendo essa informação utilizada como entrada no SIG, visando o seu subsídio para o processo decisório.

2.3 Síntese do Estado da Arte e Posicionamento deste Trabalho

O uso de métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) para problemas relacionados a inundações têm se disseminados no mundo, com uma ampla gama de aplicações, como por exemplo, classificação de alternativas para mitigação de inundações, avaliação de risco, vulnerabilidade, perigo, suscetibilidade, capacidade de enfrentamento, controle de inundação de reservatórios, entre outros.

Diversos métodos MCDM têm sido utilizados para esse tipo de problema, sejam eles compensatórios ou não compensatórios. De Brito e Evers (2016) conduziram uma revisão sistemática da literatura e verificaram que o AHP é o método mais utilizado em todas as áreas de aplicação voltadas para o gerenciamento de risco de inundação, uma vez que é considerado um método com estrutura direta, flexível e facilmente compreensível, enquanto que o MAUT tem sido ignorado, apresentando um pequeno número de aplicações distribuídas em poucas áreas.

Nesse sentido, uma lacuna presente em estudos relacionados a inundações pode ser apontada, que se refere ao pequeno número de estudos que realizam análise de incerteza, juntamente com as probabilidades de ocorrência associadas. Assim, o presente trabalho procura preencher esta lacuna, tendo em vista que o modelo proposto contribui para o estado da arte considerando aspectos probabilísticos, isto é, inserindo uma abordagem probabilística na modelagem de riscos com vários atributos, integrando, assim, as abordagens MAUT e Teoria da Decisão, em uma metodologia dividida em 9 etapas.

Vale salientar também que vários métodos citados na literatura apresentam aplicações eficientes sob uma análise unidimensional, todavia, para o contexto de gestão pública das inundações, a análise multidimensional é uma proposta a mais que objetiva fornecer uma melhor contribuição para a gestão dos recursos (HUMBERTO *et al*., 2019).

Nesse contexto, este estudo propõe um modelo multicritério para gerenciar os riscos de inundações em áreas urbanas, com base nas preferências do tomador de decisão pela Teoria da Utilidade e na consideração de dimensões de consequência social, econômica e humana.

A análise multidimensional de risco enriquece esse estudo, uma vez que permite ao decisor ter uma visão mais realista e abrangente do conjunto de possíveis consequências. Além

disso, o estudo utiliza o MAUT para caracterização matemática da incerteza, uma vez que se trata de um contexto probabilístico.

De acordo com De Almeida (2011, 2013), na etapa de modelagem probabilística, as incertezas são inseridas dentro da estrutura axiomática possibilitando uma abordagem mais consistente com relação à aplicação do MAUT em problemas de decisão multicritério sob situações de incerteza. Esta etapa da modelagem probabilística é um complemento à modelagem de preferências do decisor.

Como resultado final do modelo proposto, é fornecida uma medida de risco multidimensional, que apresenta uma priorização de risco das zonas analisadas, que cabe como *input* para o processo de gerenciamento de risco.

Desta forma, verifica-se a importância deste trabalho na proposição de um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para a análise de riscos de inundações em áreas urbanas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, descreve-se a metodologia utilizada.

3.1 Descrição do problema

As inundações urbanas são um tipo comum de risco natural provocado por chuvas intensas, que podem causar impactos em estradas, edifícios e infraestrutura, interrompendo subsequentemente o transporte, a transmissão de energia e outros sistemas críticos de infraestrutura urbana, danificando propriedades e ameaçando a vida das pessoas (LIN; WU; LIANG, 2019).

Tendo em vista os impactos advindos das inundações, o gerenciamento desse risco se torna essencial. Nesse sentido, a adoção de medidas preventivas e mitigadoras exige uma alocação de recursos que muitas vezes são escassos.

Diante disso, é importante que a alocação de recursos disponíveis seja realizada para as alternativas mais críticas. Para isso, uma alocação racional de investimentos deve ser realizada por meio da consideração de diversos aspectos, tais como econômico, operacional, características geológicas, geográficas e climatológicas, políticos, sociais, entre outros.

Posto isso, uma análise unidimensional pode não ser a melhor maneira de abordar os problemas relacionados as inundações, pois várias dimensões de risco podem ser afetadas. Assim, uma análise multidimensional é necessária, a fim de considerar aspectos econômicos, sociais e humanos.

As abordagens MCDM foram aplicadas com sucesso, desde meados dos anos 90, a fim de selecionar as melhores estratégias para a mitigação do risco de inundação, ajudando a otimizar a alocação de recursos disponíveis (DE BRITO; EVERS, 2016).

Nesse contexto, as técnicas MCDM são aplicadas a estudos que se concentram na seleção de medidas tradicionais de engenharia para reduzir o risco de inundações (Chitsaz e Banihabib, 2015; Mostafazadeh *et al.* 2017), mas também em opções não estruturais, como o desenvolvimento de planos de evacuação, aplicação de códigos de construção e esquemas de seguro (Zagonari e Rossi, 2013; Chitsaz e Banihabib, 2015).

Análises integrando técnicas MCDM e SIG têm sido utilizadas também, auxiliando a priorização de áreas para alocação de recursos disponíveis (por exemplo, Wang *et al*., 2011; Ouma e Tateishi, 2014). A combinação dessas técnicas é de grande relevância na análise

espacial multicritério, de tal forma que o SIG fornece mapas de inundação que são um elemento crucial para o gerenciamento de risco de inundação.

Portanto, o modelo proposto visa contribuir para o desenvolvimento da gestão de risco de inundações urbanas, com a proposição de um modelo de avaliação multidimensional, possibilitando ao tomador de decisão ter acesso a uma ampla gama de informações. Adicionalmente, o modelo aplicará uma análise espacial usando técnicas de SIG, bem como uma visualização gráfica dos riscos, a fim de que todos os atores entendam corretamente as particularidades do problema de decisão.

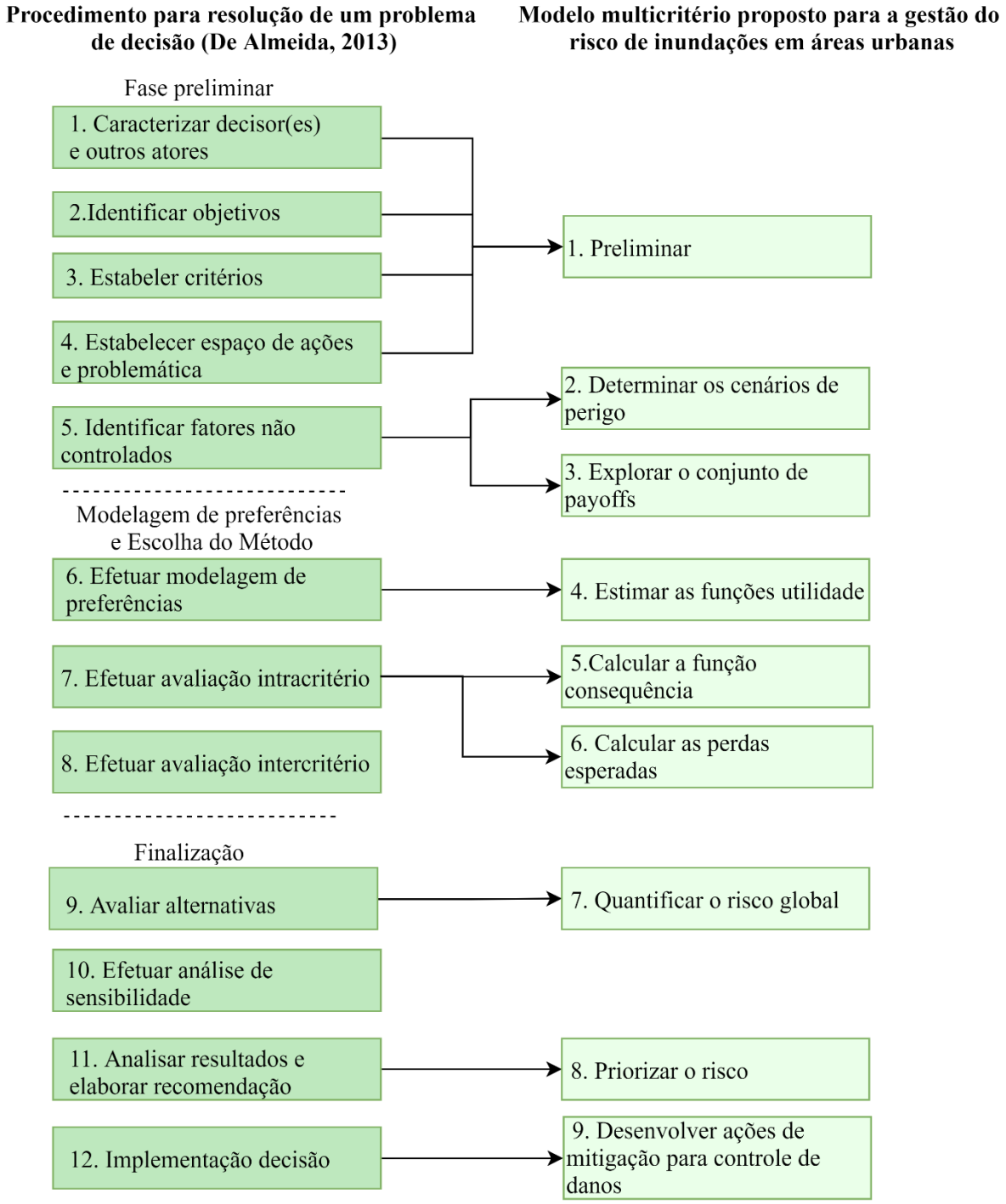
3.2 Descrição do Modelo

Esta seção apresenta o modelo multicritério de apoio a decisão aplicado para priorizar o risco de inundações em áreas urbanas.

Neste contexto, a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) é adequada ao contexto de risco, visto que fornece uma estrutura axiomática sólida e consistente para a decisão multicritério com a incorporação de elementos probabilísticos para a caracterização matemática da incerteza (HUMBERTO *et al.*, 2019).

O modelo se baseou na Teoria da Decisão e o procedimento para construção do modelo proposto teve como base as 12 etapas apresentadas em De Almeida (2013) e De Almeida *et al*. (2015). Com base nas 12 etapas, foi possível estruturar o modelo proposto, sendo este organizado em 9 etapas, que são os passos que o decisor deve construir em conjunto com o analista e os especialistas, afim de priorizar o risco a partir de uma análise probabilística.

Figura 3.1 - Modelo proposto para priorizar o risco de inundações em áreas urbanas



Fonte: Adaptado de Humberto et al. (2019).

Etapa 1 – Caracterizar decisor(es) e outros atores

A primeira etapa consiste na identificação do(s) decisor(es) do processo. A gestão integrada de risco de inundações urbanas é uma intervenção multidisciplinar e multissetorial

que está sob a responsabilidade de diversos organismos governamentais e não-governamentais (JHA; BLOCH; LAMOND, 2012).

Nesse contexto, o modelo exige que o problema seja estruturado adequadamente e sustentado pelas seguintes premissas:

a) Os atores envolvidos desempenham papéis bem definidos e não conflitantes, contribuindo para aumentar a confiabilidade do processo de tomada de decisão;
b) Diante da interação do decisor com outros atores, são esclarecidos quais objetivos serão alcançados através da resolução do processo. Adicionalmente, o decisor delimita estrategicamente a área urbana para a qual os riscos de inundação devem ser avaliados.
c) Analistas e especialistas contribuem fornecendo informações factuais para o decisor, a fim de que ele tenha uma compreensão mais completa da natureza multidimensional do ambiente envolvido quando envolvido no gerenciamento de riscos de inundação em uma área urbana.

Nesse sentido, o contexto indica que o decisor seja um gestor público que possua bom conhecimento acerca do risco das inundações, bem como sobre as políticas de controle e prevenção. Ele representa a administração local e é responsável pela tomada de decisão e sua implementação. Seu papel é extremamente importante durante o processo, pois fornece informações preferenciais (escolhas probabilísticas e julgamentos) que serão usadas para atingir os objetivos da organização.

Outros atores podem estar envolvidos no processo, como por exemplo, especialistas que forneçam informações factuais sobre o problema, e a presença de um analista que conduza o problema.

O contexto indica que o especialista seja um profissional experiente e com conhecimento técnico/científico a respeito ao problema tratado. No âmbito analisado, esse ator pode ser um representante de órgãos de defesa civil e gestão de recursos hídricos. Sendo assim, o especialista deve ter competência para explicitar seu conhecimento sobre o comportamento do estado da natureza através de uma distribuição de probabilidade a priori, bem como sobre as funções consequência para cada uma das dimensões analisadas.

A interação constante entre a analista e o decisor é importante com o intuito de promover um processo de aprendizado, cujos benefícios se estenderão em todo o processo de gestão e mitigação de inundações.

Etapa 2 – Identificar os objetivos

Como objetivo geral, o decisor visa gerenciar o risco de inundações em áreas urbanas. Esse objetivo central pode ser alcançado por intermédio de objetivos-meio, como adoção de obras de engenharia, desenvolvimento de planos de defesa civil, planejamento de uso do solo, gerenciamento de zoneamento, educação ambiental, entre outros.

Etapa 3 – Determinar os critérios

O modelo de decisão multicritério proposto é baseado na teoria da utilidade multiatributo, e em MAUT, os critérios são chamados como atributos.

Nesse sentido, na etapa 3 são definidos os atributos que devem representar os objetivos explicitados na etapa 2. A proposta deste modelo procura avaliar riscos considerando três dimensões no gerenciamento de riscos de inundação: dimensão humana (h), dimensão econômica (e) e dimensão social (s).

O impacto sobre os humanos tem sido muito estudado ao longo dos anos. Nesse sentido, Jonkman; Vrijling; Vrouwenvelder (2008) focaram seus estudos em métodos para estimar as perdas de vida devido à inundação. Penning-Rowsell *et al*. (2005) descreveram uma metodologia para estimar o provável número anual de mortes / lesões devido a inundações.

O impacto econômico também tem sido muito estudado. Neste contexto, Jonkman *et al*. (2008) apresentaram um modelo hidrodinâmico-econômico integrado, usado na Holanda para estimar os danos econômicos resultantes de grandes inundações. Koks *et al*. (2015) apresentaram um modelo integrado de risco de inundação direto e indireto para eventos de inundação de pequena e grande escala, permitindo modelagem dinâmica das perdas econômicas totais de um evento de inundação.

O impacto social também apresenta grande relevância no contexto de inundações. Da Silva *et al*. (2019) apresentam um esquema de possíveis formas de dano em áreas urbanas causadas por inundações resultantes de mudanças climáticas, apontando como uma das consequências o aumento do número de desabrigados. Dependendo da magnitude do evento de inundação, danos podem ser causados aos domicílios, levando as pessoas a perderem suas residências.

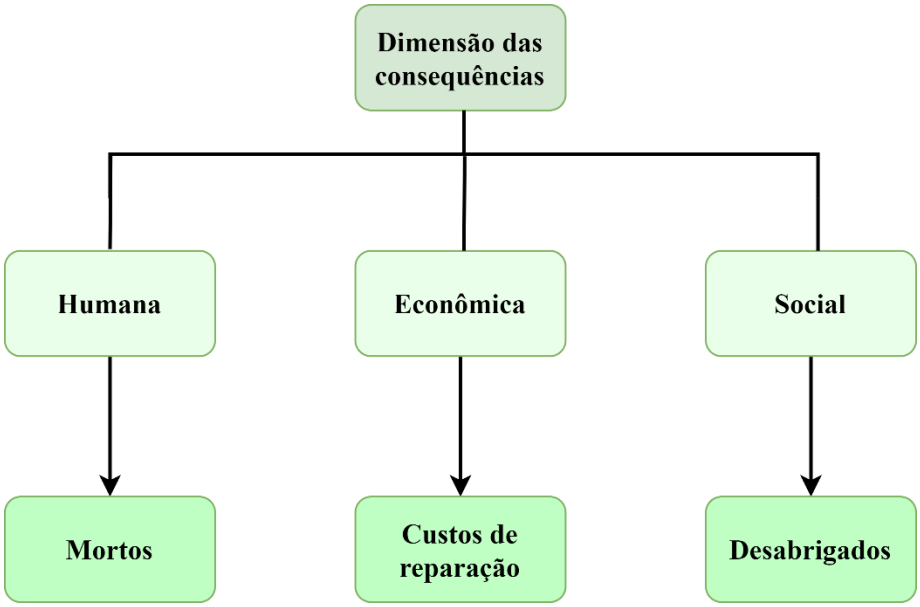
A seguir são descritas as dimensões de consequência consideradas (ver Figura 3.2):

Na dimensão humana, leva-se em consideração o impacto às vítimas decorrentes de um evento extremo. A estimativa é fornecida com base no número de pessoas mortas.

Na dimensão econômica, leva-se em conta os prejuízos monetários advindos de um evento de inundação. Para a estimativa das consequências são considerados os custos de reparação de danos causados por inundações na forma de um orçamento de restauração.

Na dimensão social, é considerado o impacto aos indivíduos cuja habitação foi afetada por dano ou ameaça de dano e que necessita de abrigo provido pelo governo. A estimativa de consequências é fornecida com base no número de pessoas desabrigadas.

Figura 3.2 - Dimensões de consequência do modelo proposto



Fonte: A Autora (2020).

Para a análise das consequências, serão utilizados elementos da teoria da decisão, no qual o estado da natureza é representado por "θ", expressando a incerteza associada ao problema, onde "A" representa o conjunto de todas as ações possíveis consideradas e "c" representa as consequências.

Etapa 4 – Delimitar espaço de ações e problemática

Essa etapa compreende a abordagem de três tópicos:

a) Estabelecer a estrutura do conjunto de alternativas:

O conjunto de alternativas do problema deve ser composto por categorias de uso e ocupação do solo, divisão geográfica, padrões de homogeneidade ou outra forma estabelecida pelo decisor para a classificação das alternativas no contexto de decisão.

Além disso, informações factuais fornecidas por especialistas ou analistas podem exigir uma delimitação personalizada do conjunto A.

b) Gerar alternativas:

Tendo em vista as divisões em categorias de uso e ocupação do solo, estas são normalmente definidas pelo governo local, que possui conhecimento do que é mais adequado para cada área da cidade. A título de exemplo, o território municipal pode ser dividido em zonas que podem ser residenciais, comerciais, industriais ou mistas. Zonas residenciais permitem a ocupação do solo urbano somente para uso residencial, zonas comerciais apenas para uso comercial e zonas industriais apenas para uso industrial. Zonas mistas permitem o uso de residencial e comercial (e eventualmente o industrial de baixa incomodidade) do terreno.

c) Estabelecer a problemática a ser aplicada a este conjunto:

Tendo em vista a necessidade de priorização de risco de inundações em áreas urbanas, a problemática mais adequada é a de ordenação, de acordo com a classificação dada por De Almeida (2013), que tem como objetivo ordenar as ações.

Etapa 5 – Identificar fatores não controlados

No problema em questão, as variáveis são consideradas de natureza probabilística, de modo que os estados da natureza influenciam nos valores das consequências.

Para garantir que o dano potencial causado pelas inundações seja medido corretamente, é necessário que o modelo incorpore o regime hidrológico local em sua estrutura axiomática, uma vez que a forte precipitação é o fator que desencadeia um evento extremo.

Tendo em vista que as inundações são provocadas por intermédio de precipitações, que não apresentam um padrão de comportamento e nem são controladas pela ação humana, devem ser consideradas como um fator não controlado pelo decisor.

Como parâmetro hidrológico mais significativo, a lâmina d'água compreenderá o fator-chave para definição dos cenários do modelo, representando, portanto, o estado da natureza θ.

Portanto, fica em evidência a necessidade de expressar probabilisticamente o comportamento de θ. Nesse sentido, o especialista deve auxiliar o decisor em uma análise frequentista, ajustando séries históricas de inundação em uma FDP apropriada, representada no modelo pela notação "Π".

A análise de previsão para ocorrência de inundações é amplamente discutida na literatura. Martins e Stedinger (2000) afirmam que a distribuição generalizada de valores extremos (GEV)

é amplamente aplicada para modelar extremos de processos hidrológicos, incluindo inundações, chuvas, velocidades do vento, altura das ondas e outros máximos. Nessa perspectiva, Salinas *et al*. (2014) destacam que em muitos países europeus, a distribuição GEV é recomendada para fornecer o melhor ajuste para dados de inundação. Por outro lado, Esteves (2013) aponta que outras distribuições de probabilidade podem mostrar um melhor ajuste para alguns conjuntos de dados.

Nesse contexto, considera-se no modelo que a qualidade do ajuste da GEV é um parâmetro adequado para previsão de inundações ao analisar o impacto hidrológico em um sistema urbano.

A função densidade de probabilidade para a GEV é um modelo flexível de três parâmetros que combina as distribuições de valor extremo máximo de Gumbel, Fréchet e Weibull. A GEV possui a seguinte FDP (PARCHURE; GEDAM, 2019):

$$\begin{aligned} f(x) &= \left\{ \frac{1}{\sigma} \exp(-(1+kz)^{-\frac{1}{k}})(1+kz)^{-1-\frac{1}{k}} \qquad k \neq 0 \right. \\ f(x) &= \frac{1}{\sigma} \exp(-z - \exp(-z)) \qquad\qquad k = 0 \end{aligned} \tag{3. 1}$$

Onde $z \equiv \frac{x-\mu}{\sigma}$, e k, σ e μ são os parâmetros de forma, escala e localização, respectivamente.

A escala deve ser positiva ($\sigma > 0$), a forma e a localização podem assumir qualquer valor real. O intervalo de definição da distribuição GEV depende de k:

$$\begin{aligned} &1 + k\frac{x-\mu}{\sigma} > 0 \qquad \text{para } k \neq 0 \\ &-\infty < x < +\infty \qquad \text{para } k = 0 \end{aligned} \tag{3. 2}$$

Vários valores do parâmetro forma (k) produzem as distribuições de valores extremos tipo I, II e III. Especificamente, os três casos k = 0, k > 0 e k < 0 correspondem às distribuições de Gumbel, Fréchet e "reverso" de Weibull. Logo, ao ajustar a distribuição GEV aos dados da amostra, o sinal do parâmetro de forma k geralmente indica qual dos três modelos melhor descreve o processo aleatório com o qual você está lidando.

Portanto, o GEV combina três distribuições mais simples em uma única forma, permitindo uma faixa contínua de formas possíveis que inclui as três distribuições mais simples. Assim, a distribuição generalizada de valores extremos nos permite “deixar os dados decidirem” qual distribuição é apropriada (CURTO; CASTELL; DEL MORAL, 2016).

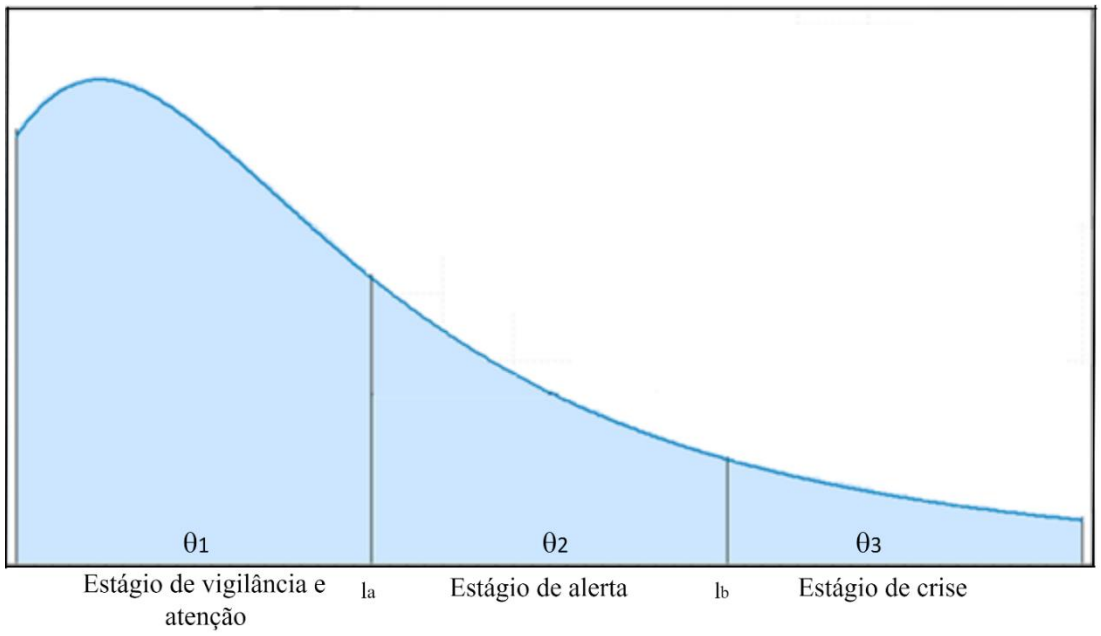
Esta função é uma base para definir cenários de perigo. Cada cenário, indicado aqui por θ_i, deverá ser modelado como um estado da natureza θ no problema de decisão. Sendo assim, os cenários de perigo correspondem a manifestações perceptíveis de θ no sistema urbano.

A Tabela 3.1 apresenta os cenários adotados no modelo, suas descrições e as probabilidades a *priori* $\pi(\theta_i)$ correspondentes. Os cenários adotados podem ser descritos através de estágios, que traduzem os níveis de severidade das inundações, que os gerentes de emergência e as agências de água no mundo geralmente classificam.

A fim de apoiar a solução do problema, a modelagem dos cenários é realizada pelo especialista, que utiliza sua experiência para estabelecer os parâmetros de lâmina d'água, denotados por l_a e l_b, sendo estes considerados os limites entre os cenários de perigo.

Portanto, cada cenário de inundação é modelado fazendo uso de faixas de lâminas d´água e através de considerações sobre as características locais do regime de chuvas e suas particularidades (ver Figura 3.3).

Figura 3.3 – Construção dos cenários



Fonte: A Autora (2020).

A partir desse ponto é possível quantificar a probabilidade de cada cenário ocorrer, isto é, as probabilidades a priori, denotadas por $\pi(\theta_i)$, para cenários definido. Portanto, as probabilidades a priori são a representação da chance de que uma determinada quantidade de precipitação gerar uma inundação com um determinado nível de severidade.

Como descrito anteriormente, elas são obtidas a partir do estabelecimento das lâminas d'água pelo especialista e com auxílio de uma FDP. Assim, as probabilidades a priori são

geradas a partir do tratamento estatístico de dados locais de precipitação, portanto, a não ocorrência de precipitação não é levada em consideração.

Tabela 3.1 – Descrição dos cenários de perigo do modelo proposto

Cenário de perigo (θ_i)	Descrição	Probabilidade a-*priori* π (θ_i)
θ_1 Estágio de vigilância e atenção	Ocorrência chuva fraca a moderada. O perigo não é alarmante, contudo, as inundações causam transtornos. Os operadores realizam monitoramento das condições meteorológicas, mantendo comunicação com os órgãos municipais que atuam nas situações de chuva, caso necessário. Danos as edificações são sentidos, com crescente exposição da população.	$\pi(\theta_1) = \Pi < l_a$
θ_2 Estágio de alerta	Ocorrência de chuva forte, ocasionalmente muito forte, podendo causar a obstrução de rotas de tráfego urbano e transtornos generalizados em uma ou mais regiões da cidade. Nesta situação as equipes emergenciais já estão atuando. Danos às condições sociais e econômicas são consideráveis, além de grande exposição da população.	$\pi(\theta_2) = l_a < \Pi < l_b$
θ_3 Estágio de crise	Ocorrência de chuvas muito fortes, com múltiplos alagamentos e deslizamentos, transtornos generalizados na maioria das regiões da cidade. Nesta situação as equipes emergenciais atuam, podendo não ser suficiente para atender as demandas. Danos em edificações são exacerbados, com grande exposição da população, e possivelmente, com alto impacto humano. Condições operacionais permitem a administração pública decretar estado de calamidade.	$\pi(\theta_3) = \Pi > l_b$

Fonte: A Autora (2020).

Etapa 6 – Efetuar modelagem de preferências

A estrutura mais adequada para representar às preferências do decisor é a estrutura (P, I), dado que o decisor consegue identificar relações de preferência e indiferença entre os pares de consequências. A estrutura (P, I) permite a obtenção de uma pré-ordem completa entre os elementos de um conjunto e se enquadra a maioria dos métodos de critério único de síntese.

Nesse sentido, essa modelagem compreende dois aspectos que devem ser observados:

a) Não há incomparabilidade, isto é, todas as alternativas podem ser comparadas entre si;
b) Adota-se uma percepção de racionalidade compensatória do decisor acerca dos desempenhos entre os critérios. Isso significa que o decisor, ao avaliar as alternativas, considera os *tradeoffs* entre os critérios.

De posse de tais características já foi possível restringir a lista de possíveis métodos a serem utilizados. Diante disto, o método escolhido para execução das etapas seguintes, tendo

em vista as considerações apresentadas, levam a aplicação da Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). Adicionalmente, serão aplicados elementos da Teoria da Decisão.

Etapa 7 – Efetuar avaliação intracritério

O método selecionado na etapa 6 faz parte dos métodos de critério único de síntese. Assim a avaliação intracritério consiste na elicitação da função utilidade para cada atributo.

Dentro desse contexto, é necessário que seja realizada a normalização dos valores do conjunto de consequências, deixando-os numa escala intervalar, na qual o desempenho da pior alternativa recebe valor igual a 0 e da melhor alternativa recebe o valor igual a 1, onde todos os desempenhos intermédios recebem um valor entre 0 e 1.

Na avaliação intracritério, isto é, quando se subdivide a avaliação da função utilidade "U" em partes, ajustes de curvas que representam as preferências do decisor com relação às dimensões de consequências consideradas no modelo (funções utilidade unidimensionais) são realizados. Estes ajustes consideram a atitude de risco de um indivíduo, que pode se apresentar propenso, avesso ou neutro ao risco para uma determinada situação em cada dos atributos analisados. Estas hipóteses associadas ao comportamento do decisor são mutualmente exclusivas e coletivas exaustivas quando aplicadas para qualquer loteria (KEENEY e RAIFFA, 1976).

Na avaliação intracritério, a definição das funções consequência também é necessária, haja vista que a função de perda combina a função consequência e a função utilidade destas consequências. Assim, considerações distintas são estabelecidas para a definição da função consequência em cada um dos atributos. Portanto, na ocorrência de um evento de inundação, uma avaliação probabilística das consequências em cada dimensão é necessária, na qual determina as funções de probabilidade da consequência, ou seja, determina a probabilidade de se obter uma dada consequência (c) dado que ocorreu um cenário (θ) em uma zona (Z_n), que é representado por $P(c|\theta, Z_n)$.

Nesse sentido, a independência entre as variáveis aleatórias das consequências é um ponto importante, uma vez que os métodos compensatórios, como o MAUT, realizam uma agregação de desempenho entre dimensões de riscos em uma medida única de risco e precisam determinar as probabilidades conjuntas das dimensões analisadas.

Nesse estudo, avaliam-se os riscos de inundações em áreas urbanas, considerando as consequências nas dimensões de impactos humana, social e econômica de maneira aleatória e independente. A título de exemplo, as consequências advindas de um evento de chuvas fortes,

em uma zona com grande ocupação de áreas ribeirinhas, podem apresentar forte impacto social haja vista que as pessoas devem deixar suas casas, médio impacto econômico às construções e pequeno impacto humano, caso existam sistemas de alerta a inundações, abrigos ou equipes de resgate.

Portanto, o modelo considera que as funções consequência nas dimensões consideradas não tenham correlação significativa para que possam ser estimadas isoladamente. De forma geral, o estado da natureza afeta as dimensões de forma aleatória e independente.

Assim, os analistas e especialistas apoiam o decisor buscando estimar P(c|θ, Z_n) como FDPs. A análise estatística adiciona o aspecto da incerteza de forma coerente. A incerteza é inerente à análise de risco, enquanto os FDPs são estimativas representativas dessas probabilidades.

Diante das considerações, foram obtidas as FDPs das dimensões de impactos humana, econômica e social, como mostrado a seguir:

- Função probabilidade da dimensão humana - $P(c_{h(l)}|\theta_i, Z_n)$

A consequência humana será mensurada pelo número de pessoas mortas em cada zona de estudo, tendo em vista a que vulnerabilidade e exposição de áreas urbanas juntamente com altos níveis de severidade de inundação podem levar a fatalidades.

Nesse sentido, o número de pessoas que podem morrer pode ser modelado como um processo de Poisson. Assim, a probabilidade de um número de pessoas morrer é dada por:

$$P(c_{h(l)}|\theta_i, Z_n) = \frac{(\lambda_{h(l)})^{c_{h(l)}}}{c_{h(l)}!} e^{-\lambda_{h(l)}} \quad (3.\ 3)$$

onde $c_{h(l)}$ é o número de pessoas mortas em função da lâmina d'água e $\lambda_{h(l)}$ é o número médio de pessoas mortas por área, considerando a extensão geográfica do conjunto A, em função da lâmina d'água quando ocorre um cenário de chuva.

De acordo com Doane e Seward (2014), para se usar a distribuição de Poisson, os eventos devem ocorrer aleatória e independentemente (cada ocorrência do evento não afeta a probabilidade de outros eventos ocorrerem) no espaço ou em tempo contínuo. Esse modelo tem somente um parâmetro denotado por λ, o qual representa o número médio de eventos por unidade de tempo (minuto ou hora) ou espaço (metros quadrados ou quilômetros lineares). Além disso, as distribuições de Poisson são sempre assimétricas à direita (cauda direita longa), mas se tornam menos assimétricas e mais em forma de sino conforme o valor de λ aumenta.

Diante dessas considerações, a distribuição de Poisson se mostra uma representação útil para medir os danos aos seres humanos.

Os impactos sobre a dimensão humana dependem de vários fatores, como a profundidade que a água alcança, a velocidade do fluxo, as características da zona, se há sistema de alerta a inundações, se as pessoas conseguem evacuar ou são resgatadas, entre outros.

De acordo com o National Weather Service (2019), apenas seis polegadas (152,4 mm) de água de inundação em movimento rápido podem derrubar um adulto. Além disso, são necessários apenas dois pés (609,6 mm) de água para transportar a maioria dos veículos. Isso inclui pickups e SUVs.

Mais da metade de todos os afogamentos relacionados a esse desastre natural ocorrem quando um veículo é conduzido pelas águas de inundação perigosas, além disso, a porcentagem de mortes relacionadas a entrar nas águas de inundação também é alta, uma vez que as pessoas subestimam a força e o poder da água (NATIONAL WEATHER SERVICE, 2019).

- Função probabilidade da dimensão econômica - $P(c_{e(l)}|\theta_i, Z_n)$

Se o estado da natureza acontece, é considerado a fim de simplificação que consequências ocorrem na dimensão econômica. As consequências econômicas podem ser estimadas por meio dos custos de reparação.

Segundo Nascimento *et al*. (2007), os danos físicos causados em uma construção que foi inundada podem ser estimados por meio da avaliação de seus custos de reparo na forma de um orçamento de restauração. Nesse sentido, os autores apontam que os danos físicos fazem parte dos danos diretos, isto é, aqueles que resultam do contato direto das águas da inundação com imóveis residenciais, comerciais e públicos e estão relacionados à deterioração física dessas propriedades.

A função de densidade de probabilidade log-normal pode ser utilizada para o cálculo da função consequência econômica, sendo expressa por:

$$P\left(c_{\mathrm{e}(l)}\middle|\theta_i, Z_n\right) = \frac{1}{c_e(l)\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(lnc_e(l)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \text{ para } c_{e(l)} > 0 \qquad (3.4)$$

Onde $c_{\mathrm{e}(l)}$ é o custo de reparação do dano em função da lâmina d'água as edificações de uma zona, μ é a média do custo e σ representa o desvio padrão do custo.

De acordo com Chou, Yang e Chong (2009), as distribuições normais, log-normal e beta são as mais comumente usadas para especificar o custo, pois o custo de projeto só pode ser positivo (CHOU; YANG; CHONG, 2009). Wall (1997) ressalta que há duas visões dominantes

na literatura sobre a questão de qual forma de distribuição estatística (a beta ou a log-normal) é mais apropriada para representar os dados de custo dos edifícios, apontando em seu trabalho que a distribuição log-normal representa melhor os dados de custo britânicos de construção do que a distribuição beta.

Tendo em vista que a distribuição log-normal é sempre positiva e as estimativas de custo são sempre valores positivos, então esta distribuição se mostra adequada.

- Função probabilidade da dimensão social - $P(c_{s(l)}|\theta_i, Z_n)$

Se o estado da natureza acontece, é considerado que consequências ocorrem na dimensão social. As consequências sociais podem ser estimadas pelo número de desabrigados, que de acordo com o glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres elaborado por Castro em 1998, corresponde a desalojado ou pessoa cuja habitação foi afetada por dano ou ameaça de dano e que necessita de abrigo provido pelo Sistema.

De forma similar a função consequência humana, a probabilidade de um número de pessoas ficarem desabrigadas é dada por:

$$P(c_{s(l)}|\theta_i, Z_n) = \frac{(\lambda_{s(l)})^{c_{s(l)}}}{c_{s(l)}!} e^{-\lambda_{s(l)}} \quad (3.5)$$

onde $c_{s(l)}$ é o número de pessoas desabrigadas em função da lâmina d'água e $\lambda_{s(l)}$ é o número médio de pessoas desabrigadas por área, considerando a extensão geográfica do conjunto A, em função da lâmina d'água quando ocorre um cenário de chuva.

Uma vez obtidas às probabilidades das consequências e as funções de utilidade de cada dimensão, a perda esperada pode ser calculada através da Equação 3.6:

$$\mathrm{L}(\theta, Z_n) = E_\theta\left[u\left(c_{h,}c_e, c_s\right)\right] = -\int_c \mathrm{P}\left(c_{h,}c_e, c_s|\ \theta, Z_n\right)\mathrm{u}(c_{h,}c_e, c_s)\mathrm{dc} \quad (3.6)$$

Onde $\mathrm{P}\left(c_{h,}c_e, c_s|\ \theta, Z_n\right)$ corresponde à distribuição de probabilidade conjunta sobre os valores de consequências nas dimensões adotadas $c_{h,}c_e, c_s$, dado que tenha ocorrido um cenário (θ) na zona (Z_n). Portanto, uma função de perda significa o valor esperado da utilidade combinando a função de consequência e a função de utilidade.

O sinal negativo da equação é justificado sob a ótica da Teoria da Decisão, onde Berger (1985) aponta que as perdas associadas a risco são o negativo da função utilidade. A análise de risco nessa modelagem está intimamente relacionada à perspectiva de perda e é o corolário da função de utilidade que avalia a incerteza da perspectiva de ganho.

Obtidas as perdas, a estimação dos riscos unidimensionais pode ser calculada, visto que é dada a partir da soma das perdas atreladas aos cenários possíveis multiplicada pelas probabilidades de sua ocorrência (probabilidade a priori).

Por definição de Berger (1985), o risco de uma alternativa na área urbana em estudo é dado pelo valor esperado da função de perda: quanto maior esse valor, mais graves são as consequências, como mostrado na Equação 3.7:

$$r(Z_n) = E_\theta[L(\theta, Z_n)] = -\sum_{\theta} \pi(\theta_i) \int_c P\left(c_{h,} c_e, c_s \mid \theta, Z_n\right) u(c_{h,} c_e, c_s) dc \quad (3.7)$$

Sob essa ótica, o conceito de risco usado, que se baseia na teoria da decisão, avalia as consequências (c) dos cenários de chuva (θ) e combina as incertezas associadas com as consequências $P(c|\theta, Z_n)$ e os cenários ($\pi(\theta)$).

Nesse estudo, é analisado o impacto gerado pela ocorrência de chuva, ou seja, o modelo não quantifica o cenário de normalidade do problema de decisão, pois esse cenário é caracterizado pela ausência de chuvas.

Adicionalmente, como será visto na etapa 9, a medida de risco usada considera a estrutura de preferência do decisor no conjunto das consequências esperadas, por meio da função utilidade u(c) e assim, representa a representa a "desejabilidade" que o decisor tem sobre a perda dos bens e possibilita uma avaliação probabilística das consequências sob incerteza.

Etapa 8 – Efetuar avaliação intercritério

Concluída a avaliação intracritério e obtidas as utilidades unidimensionais desejadas, é realizada a avaliação intercritério do método. Na avaliação intercritério a função utilidade multiatributo pode adquirir a forma de uma função aditiva ou a forma de uma função multilinear.

A função utilidade pode adquirir a forma de uma função aditiva quando for verificada a independência aditiva nos atributos. Posto isto, a função utilidade aditiva pode ser representada pela Equação 3.8, o que significa independência das preferências do decisor com relação aos atributos considerados.

$$\text{u}\,(c_h, c_e, c_s) = k_{c_h} u(c_h) + k_{c_e} u(c_e) + k_{c_e} u(c_s) \quad (3.8)$$

onde u (c_h, c_e, c_s) são as funções utilidades unidimensionais [0,1] e os k's são as constantes de escala que indicam o valor do *tradeoff*. Estas constantes são elicitadas pelos procedimentos de elicitação baseados na comparação de loterias (KEENEY e RAIFFA,1976). A soma dos k_i precisa ser igual a "1".

Neste estudo é considerado que a função de utilidade multiatributo seja aditiva, o que implica na independência de preferência aditiva do decisor entre os atributos.

Etapa 9 – Avaliar alternativas

Nesta etapa, uma vez obtidas as constantes de escala e os riscos unidimensionais, por meio de agregação, o risco global de uma alternativa Z_n pode ser calculado conforme Equação 3.9.

$$\mathrm{r}_{\mathrm{global}}(Z_n) = \sum k_{c_h,c_e,c_s} r(Z_n) \tag{3. 9}$$

O risco global, $\mathrm{r}_{\mathrm{global}}(Z_n)$, é dado pela multiplicação de riscos unidimensionais, $r(\theta_i, Z_n)$, pelas suas respectivas constantes de escala k_{c_h,c_e,c_s}.

Como mencionado, os valores das constantes da escala são obtidos a partir de um protocolo estruturado por Keeney e Raiffa (1976). Em geral, esse processo leva em consideração as escolhas entre consequências determinísticas e loterias com probabilidades específicas em relação aos melhores e aos piores payoffs. Como os atributos não violam as duas condições de independência preferenciais, conforme estabelecido por Keeney e Raiffa (1976), a agregação aditiva é permitida.

A medida de risco usada considera a estrutura de preferência do decisor no conjunto das consequências esperadas, por meio da função utilidade u(c) e assim, representa a "desejabilidade" que o decisor tem sobre a perda dos bens e possibilita uma avaliação probabilística das consequências sob incerteza.

Tendo em vista os riscos globais calculados, pode ser obtido o ordenamento das áreas mais críticas do conjunto de alternativas. Desse modo, a análise de resultados ao ordenar esses valores procura fornecer informações que indiquem a melhor maneira de melhorar os planos de mitigação de desastres e atender aos objetivos do decisor. Nesse sentido, a ordenação de risco de atributos múltiplos representa um meio de priorizar o risco de inundação, no que diz respeito às dimensões e aos cenários de risco.

Nesta etapa, o ponto central é que esses dados sejam mostrados de forma a garantir que o decisor os entenda corretamente. Portanto, o ranking de risco obtido pode não ser suficiente para uma análise satisfatória do risco de inundação considerando o conjunto de alternativas no contexto urbano. Neste caso, o analista poderia auxiliar o decisor através da interpretação das saídas do modelo.

Diante deste contexto, a modelagem propõe formas alternativas de visualizar os resultados, buscando assim apoiar a importante tarefa de mitigar essas consequências. Assim,

Alencar e De Almeida (2010) com base na escala intervalar das funções de utilidade compararam incrementos do valor de utilidade entre as alternativas. A Equação 3.10 mostra como esse parâmetro é calculado.

$$razão = \frac{r_{global}(Z_x)_{\beta i} - r_{global}(Z_y)_{\beta i+1}}{r_{global}(Z_y)_{\beta i+1} - r_{global}(Z_z)_{\beta i+2}} \quad (3.10)$$

Onde $razão$ significa a comparação entre o risco global de uma alternativa Z_x (cuja posição respectiva é βi) e o risco global de alternativas cujas posições de ordenação são adjacentes (neste caso, posições adjacentes são dadas por β_{i+1} e β_{i+2}, tal que as alternativas associadas a essas posições são, respectivamente, Z_y e Z_z). Portanto, a razão é calculada considerando a diferença relativa entre os riscos globais cujas posições são adjacentes.

Segundo Keeney e Raiffa (1976), a escala intervalar da função utilidade possibilita a comparação de incrementos de utilidade em relação as alternativas. Assim, incrementos de risco podem ser avaliados pelo decisor através dessa informação.

Etapa 10 – Efetuar análise de sensibilidade

Uma análise de sensibilidade deve ser realizada para a verificação da robustez do modelo, tal que os resultados devem garantir ao decisor a recomendação proposta.

A análise de sensibilidade deve fornecer informação de quais variáveis/ parâmetros são sensíveis às pequenas mudanças, como também deve identificar aquelas que não proporcionam mudança alguma no resultado final quando seus valores de entrada são modificados. Esse dado também é importante, uma vez que, espera-se com esse trabalho, proporcionar o começo para futuras análises de remoção e ou alteração de variáveis/parâmetros do modelo.

Etapa 11 – Analisar os resultados e elaborar recomendações

Tendo vista que o objetivo é apresentar e aplicar um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo para apoiar a priorização do risco de inundação em áreas urbanas, uma vez obtida essa priorização e realizada a análise dos incrementos de risco, o decisor tem uma melhor percepção da situação de risco para planejar ações de mitigação e alocar recursos.

Sob essa perspectiva, uma vez analisados os resultados de quais riscos de inundação são prioritários na área urbana, o próximo passo é a elaboração de um plano de monitoramento que vise projetar, planejar e executar ações estratégicas que ajudarão o decisor a mitigar o impacto de tais inundações e, portanto, os danos que isso pode causar. Além disso, esta etapa suporta a

dinâmica de alocar recursos e elaborar projetos de manutenção para áreas afetadas por inundações, aumentando assim a resiliência dos espaços urbanos à medida que a vulnerabilidade diminui.

Ainda nessa etapa, os resultados obtidos por meio da modelagem hidrodinâmica e do SIG são analisados, de modo a apresentar ao decisor o tipo de relação entre mancha de inundação e o impacto provocado por ela.

Etapa 12 – Implementar decisão

A implementação de um plano de monitoramento envolve a participação conjunta de partes interessadas, tal como comunidades científicas, empresas, população local e administração pública, para que possam entender a importância e a necessidade da demanda por medidas estruturais e não estruturais para combater as inundações.

A decisão a ser implementada beneficiará as alternativas que obtiverem as primeiras posições na priorização de risco. Como normalmente não existem recursos para ser alocados para todas as alternativas, aquelas que se mostrarem sob condição de maior risco, devem receber atenção no momento do planejamento de ações e alocação dos recursos disponíveis.

3.3 Aplicação do Modelo e Discussão Preliminar dos Resultados

O fluxograma descrito na Fig. 3.1 apresenta as etapas do modelo proposto, tal que o passo a passo foi estabelecido para guiar o decisor durante o processo e a sequência de cada passo foi organizada de forma que a modelagem de preferências sob risco seja facilitada pelo uso de procedimentos úteis com uma forte estrutura axiomática, e para priorizar as alternativas no espaço de ações A de modo a agregar essas informações.

Nesse sentido, a aplicação do modelo de decisão multicritério é apresentada com o objetivo de avaliar os riscos de inundação em áreas urbanas e posteriormente ordená-las. Este é um estudo hipotético, embora sejam utilizados dados realísticos. Sob essa ótica, a área de estudo onde será aplicado o modelo situa-se no nordeste do Brasil. Possui 47 hectares de área territorial e clima tropical úmido. Apresenta-se sujeita a inundações principalmente devido a forma que se deu a ocupação da cidade, com o aterramento dos seus mananciais ao longo dos séculos. A área urbana delimitada para o estudo de caso é composta por zonas estabelecidas pela Lei de Uso e Ocupação do Solo do município. Estas zonas representam o conjunto de alternativas A, sendo estas denominadas de Z1 a Z7.

Diante das considerações apresentadas, a aplicação do modelo seguiu as 9 etapas que compreendem três fases principais da resolução do problema:

Etapa 1 - Preliminar

Essa etapa corresponde as etapas 1,2, 3 e 4 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Nesta etapa, os esforços estão concentrados na otimização da interação entre o decisor, o analista e outros especialistas com o objetivo de caracterizar as inundações na área urbana estudada.

A aplicação do modelo considera o decisor como um gestor público. Nesse sentido, os resultados obtidos devem refletir suas preferências. Por conseguinte, presume-se que a estrutura de preferência do decisor reflete a estrutura de preferência dos demais representantes do governo. Nessa perspectiva, ele deve ter alguma experiência e conhecimento deste tipo de análise, podendo contar com o auxílio de outros atores do processo decisório.

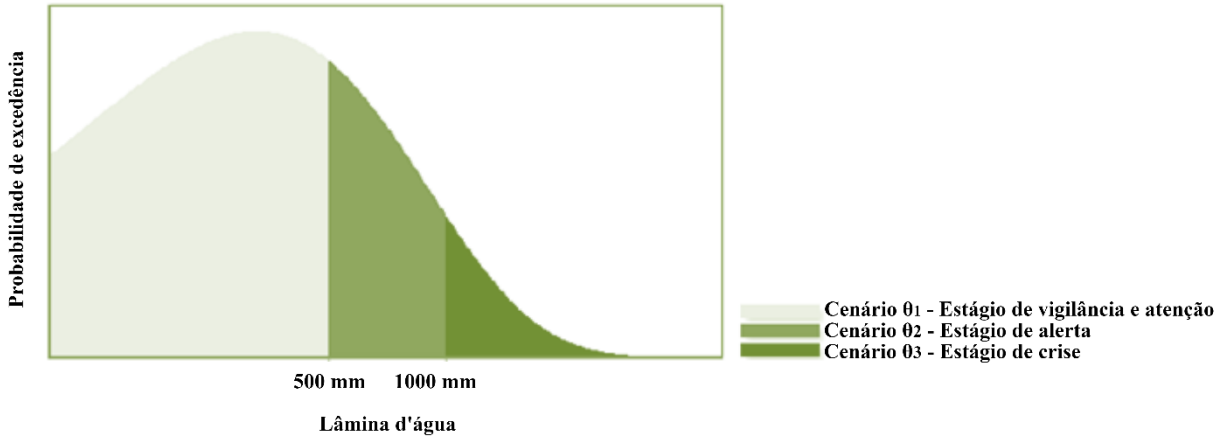
Etapa 2 - Determinar os cenários de perigo

Essa etapa corresponde a etapa 5 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Foram considerados três cenários de perigo, sendo estes baseados em diferentes níveis de severidade das inundações, conforme descrito na Tabela 3.1. Nesse sentido, para modelagem dos cenários de perigo, foram consideradas informações disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), tais como de tendência de precipitação da região, que compreende a chuva acumulada que caracteriza uma dada categoria de intensidade de chuva.

Os parâmetros lâmina d'água foram estimados com base em dados hidrológicos locais, sendo l_a = 500 mm e l_b = 1000 mm (ver Figura 3.4).

Figura 3.4 – Construção dos cenários da área de estudo



Fonte: A Autora (2020).

Sob essa ótica, adotou-se para o cenário θ_1, que correspondente ao estágio de vigilância e atenção, a faixa de lâmina d'água de até 500 mm. O relatório apresentado pela Environment Agency (2019), aponta que a lâmina d'água a 150 mm normalmente excede a altura do meio-fio (a altura padrão do meio-fio é de 125 mm) e pode causar inundações de propriedades em algumas áreas e a 300 mm de profundidade é provável que causem inundações de propriedades (ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Ainda com base em dados locais e nesse relatório, adotou-se que para o cenário θ_2, que correspondente ao estágio de alerta, a faixa de lâmina d'água que o representa é de 500 mm a 1000 mm, que é aproximadamente uma altura de água até a cintura de um indivíduo. As medidas de resiliência a inundações no nível da propriedade geralmente são eficazes até uma profundidade da água de 600 mm acima do nível do chão, de modo que em profundidades acima de 600 mm, essas medidas provavelmente serão muito menos efetivas e os danos estruturais terão maior probabilidade de ocorrer (ENVIRONMENT AGENCY, 2019).

Nessa perspectiva, a faixa de lâmina d'água associada ao cenário θ_3, que corresponde ao estágio de crise, foi considerada de acima de 1000 mm, baseando-se em eventos de chuva como o ocorrido em julho de 2019 na área de estudo, haja vista que este mês é um dos que apresenta as maiores médias mensais de precipitação na região, causando mortes e deixando desabrigados. Baseando-se também na Environment Agency (2019), é apresentado em seu relatório que profundidades variando entre 900 mm e 1200 mm já é muito provável que exceda a profundidade máxima de inundação, onde as medidas de resiliência a inundações da propriedade ainda são efetivas.

Como mencionado na seção 3.2, etapa 5, um especialista pode utilizar seu conhecimento para definir as lâminas d'água.

No que concerne as probabilidades a priori para cada cenário de risco, estas são obtidas com o auxílio da distribuição de probabilidade GEV, que traduz o comportamento das inundações segundo uma análise frequentista quando se analisa o impacto hidrológico nas alternativas, considerando dados de séries históricas e os parâmetros de contorno dos diferentes níveis de severidade adotados pelo modelo. Nesse sentido, os valores dos dados hidrológicos foram ajustados a essa distribuição.

Portanto, as probabilidades dos cenários de risco foram estimadas, estabelecendo para cada cenário a distribuição de probabilidade a priori: $\pi(\theta_1) = 0{,}97813$, $\pi(\theta_2) = 0{,}01689$ e $\pi(\theta_3) = 0{,}00498$.

Etapa 3 - Explorar o conjunto de payoffs

Essa etapa corresponde a etapa 5 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

O conjunto de alternativas do problema é discreto e composto por zonas, cujo zoneamento é definido por meio de instrumento que regula o uso e ocupação do solo. No Brasil, o instrumento que regula o uso e ocupação do solo é o Plano Diretor, assim, o zoneamento do local de estudo será utilizado para definição das alternativas.

Para modelar o problema, todas as consequências foram simuladas com base em 7 alternativas que representam diferentes zonas que definem usos e parâmetros de ocupação do solo, visando avaliar em cada uma delas seu comportamento ao risco. As zonas consideradas e suas respectivas descrições são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Zonas do estudo de caso

Zonas	Descrição
Z1	Caracterizada pela ocupação intensiva, isto é, pela habitação coletiva de maior densidade (verticalização), através da substituição de antigas estruturas horizontalizadas, objetivando controlar o seu adensamento.
Z2	Caracterizada pela concentração da Mata Atlântica e de seus ecossistemas associados e pelos parques públicos urbanos.
Z3	Composta por áreas de importante significado histórico e/ou cultural.
Z4	Compreende áreas formadas por sítios, conjuntos ou edifícios isolados de expressão artística, cultural, histórica, arqueológica ou paisagística, considerados representativos da memória arquitetônica, paisagística e urbanística da cidade.
Z5	Composta por edificações públicas ou privadas, desocupadas, subutilizadas, visando à reabilitação de imóveis.
Z6	Compreende espaços inseridos na malha urbana, geralmente vegetados, necessários à preservação das condições de amenização climática, cuja função é manter ou elevar a qualidade ambiental e paisagística da cidade.
Z7	Caracterizada por área de ocupação humana com significativos atributos naturais e culturais, que compreende sítios de valor paisagístico de interesse natural e cultural.

Fonte: A Autora (2020).

A Tabela 3.2 foi construída com base na Lei nº 17.511/2008 do município do Recife.

Diante da delimitação do conjunto de alternativas A, são estabelecidos os atributos e explorados os payoffs. Vários estudos na literatura exploram diferentes dimensões do risco de inundação e apoiam a suposição deste modelo de que existem três atributos que se destacam (Tabela 3.3).

Nesta etapa, o analista deve auxiliar o decisor a definir como medir esses atributos. Payoff é a consequência causada pelo evento extremo na dimensão considerada.

Tabela 3.3 - Resumo de atributos para uma análise integrada

Atributo	Descrição	Medida de dano
Humano	A vulnerabilidade e a exposição de áreas urbanas, juntamente com altos níveis de severidade das inundações resultam em mortes.	O número de fatalidades.
Econômico	Compreende os impactos a infraestrutura das edificações: prédios públicos e privados.	Perda monetária por unidade de área.
Social	Compreende os impactos sociais: as inundações afetam moradias, podendo deixar pessoas desabrigadas. Diante disto, é necessária assistência social do governo local para reparar esses danos.	O número de pessoas desabrigadas.

Fonte: A Autora (2020).

Etapa 4 - Estimar as funções utilidade

Essa etapa corresponde a etapa 6 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

A elicitação da função utilidade acontece sobre um intervalo fechado de consequências, no qual o valor máximo limita-se a uma consequência nula (não haver impactos) e o valor mínimo pela maior das consequências estimadas (pior perda possível). É necessário ressaltar que embora se possam ter valores discretos e enumeráveis (número de pessoas mortas/desabrigadas) nas consequências humana e social, os conjuntos das consequências nas três dimensões podem ser considerados contínuos para fins da estimação da função utilidade.

Supõe-se que a estrutura de preferência do decisor é independentemente aditiva entre os critérios, assim, as funções de utilidade do ponto de vista de utilidade unidimensional $(u(c_h), u(c_e), u(c_s))$, podem ser elicitadas separadamente.

Considerando também que o decisor tem um comportamento conservador quando se trata de questões relacionadas às perdas humanas, isto é, um comportamento de aversão ao risco, a função de utilidade unidimensional é dada por:

$$u\left(c_{h(l)}\right) = 1 - \left(\frac{c_{h(l)}}{\max(c_{h(l)})}\right)^{\alpha_h} \tag{3. 11}$$

Por outro lado, supondo-se que o decisor tenha um comportamento propenso ao risco nas dimensões econômica e social, as funções de utilidades unidimensionais são dadas por:

$$u\left(c_{e(l)}, c_{s(l)}\right) = e^{-(\alpha_{e,s})(c_{e,s})} \tag{3. 12}$$

onde c_h, c_e e c_s são as consequências avaliadas em cada dimensão de risco que variam de acordo com a altura da lâmina d'água; e, α_h, α_e e α_s são os parâmetros de ajuste das funções utilidades unidimensional, que podem ser determinados através do uso de loterias ou pelo ajuste das funções utilidades computacionalmente. Nesse sentido, foram realizadas elicitações e através de loterias os parâmetros de ajuste das funções utilidades unidimensional (α_h, α_e e α_s) foram obtidos.

Esse procedimento de elicitação das preferências do decisor pode ser realizado de duas formas:

- Fixando as probabilidades de ocorrência e variando os valores das consequências;
- Variando as probabilidades de ocorrência e fixando os valores das consequências;

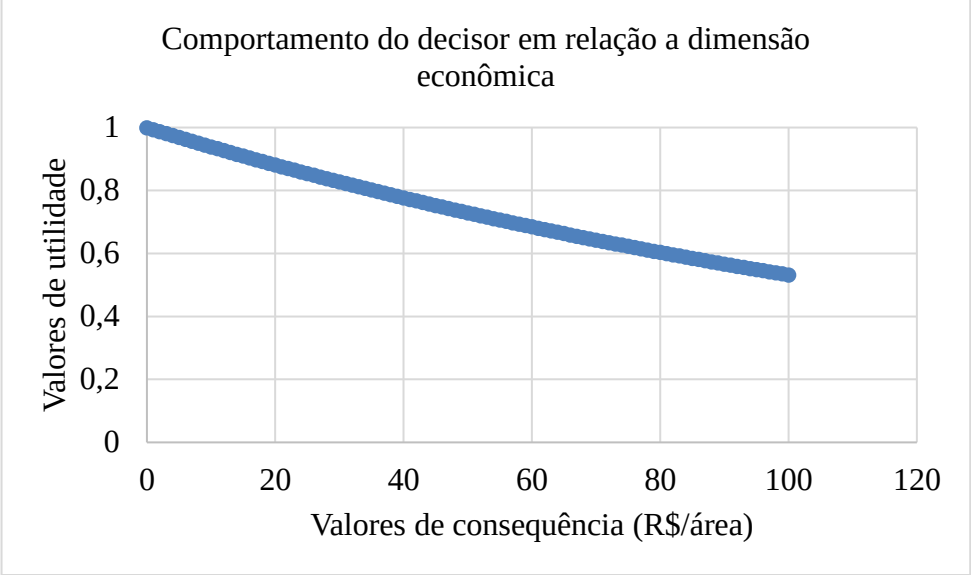
Neste estudo, o procedimento utilizado foi o segundo, onde quem varia são as probabilidades. Vale ressaltar que o decisor deve declarar sua preferência entre a loteria [x_n, p; x_1, 1-p] e a consequência x_i, sendo o valor de x_i definido com equivalente certo, quando, para o decisor, há indiferença entre a loteria e x_i.

Após a elicitação das preferências do decisor, os valores de utilidade unidimensional foram ajustados as funções de utilidade unidimensional de acordo com a dimensão considerada (conforme Equações 3.11 e 3.12). Assim, foram obtidos os parâmetros de ajuste que melhor se adequam aos pontos elicitados.

No que concerne o comportamento do decisor em relação a dimensão humana, após a elicitação, os valores de utilidade unidimensional foram ajustados a Equação 3.11, que foi a função proposta como sendo um ajuste adequado ao comportamento do decisor, sendo este de aversão ao risco. Foi notado na prática dessa simulação, que o α foi de 1,02, cujo comportamento ajustado é ligeiramente averso ao risco.

Sob a perspectiva do comportamento do decisor em relação a dimensão econômica, após a elicitação, os valores de utilidade unidimensional foram ajustados a função proposta, ou seja, para o caso que se assume que o decisor apresenta uma propensão risco, conforme a Equação 3.12. O parâmetro α foi de 0,007, cujo comportamento ajustado percebe-se que é ligeiramente propenso ao risco.

Figura 3.5- Comportamento do decisor em relação a dimensão econômica



Fonte: A Autora (2020).

Por fim, no que tange o comportamento do decisor em relação a dimensão social, após a elicitação, os valores de utilidade unidimensional foram ajustados a Equação 3.12, que foi a função proposta como sendo um ajuste adequado ao comportamento do decisor, sendo este de propensão ao risco. Nesse caso, o α foi de 0,104, cujo comportamento ajustado é ligeiramente propenso ao risco.

Etapa 5 - Calcular a função consequência

Essa etapa corresponde a etapa 7 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Como já mencionado, a avaliação das consequências foi abordada a partir de três dimensões de consequência: impactos sobre os humanos, impactos sociais e impactos econômicos. As probabilidades das consequências são definidas para cada zona, considerando cada cenário de perigo e consequentemente as faixas de lâminas d'água que o representam. A construção das funções consequência do modelo foi feita através da interação do analista com o decisor, de tal forma que o cálculo foi realizado com base no estado da natureza e no conjunto de alternativas distribuídas no local de estudo. Assim, as probabilidades foram estimadas usando FDPs.

Nesse sentido, no que diz respeito as consequências sobre os seres humanos, foi obtida a probabilidade de fatalidade de um determinado número de pessoas em função da altura da lâmina d'água para cada cenário de perigo através da distribuição de probabilidade de Poisson.

O número de pessoas mortas se baseia em informações locais de eventos passados. Assim, o número médio de pessoas mortas por área em função da área analisada é determinado através das informações do local de estudo e das áreas de cada zona, as quais foram estimadas por meio do sistema de informação geográfica utilizado. Vinet *et al*. (2019) apontam que o fato de uma região ser densamente povoada não significa que o número médio de mortes por evento será alto, uma vez que outras variáveis, como prevenção, preparação para desastres ou aviso de inundação, influenciam o número médio de mortes de eventos de inundação.

No que se refere as consequências econômicas, foram considerados os custos unitários de reparação tendo em vista a profundidade de inundação para cada cenário de perigo, através da função densidade de probabilidade da distribuição Log-normal. Para isso, tomou-se como base um estudo de caso realizado por Nascimento *et al*. (2007), onde foi realizada uma avaliação de danos às edificações causados por inundações e obtidos os custos de reparação na forma de orçamentos de reforma.

Dentro desse contexto, foram estabelecidos 4 níveis distintos de padrão construtivo: alto, normal, baixo e popular, sendo estes classificados por meio da caracterização da qualidade da construção. Além disso, utilizou-se o Critério Brasil como indicativo do status social dos habitantes, através de cinco classes socioeconômicas (A, B, C, D, E). Para a estimativa das áreas das construções, foi utilizado o Custo Unitário Básico (CUB/m²), isto é, o custo por metro quadrado de construção do projeto-padrão considerado, estabelecido pelos Sindicatos da Indústria da Construção Civil, fazendo relação com as classes socioeconômicas. Assim, foram verificadas curvas de danos versus profundidade de submersão com danos expressos em R$ por área construída da habitação, no qual para cada classe social foi verificada uma curva.

Tendo em vista que cada cenário de chuva possui uma faixa de lâmina d'água que o representa, as curvas de danos x profundidade de submersão foram utilizadas para obtenção do custo de reparação, de tal forma que estes foram relacionados com padrões construtivos que existem em cada zona. Vale ressaltar que o número de domicílios de cada zona foi estimado pelo SIG utilizado.

No que tange as consequências sociais, foi obtida a probabilidade de um determinado número de pessoas ficarem desabrigadas em função da altura da lâmina d'água para cada cenário de perigo através da distribuição de probabilidade de Poisson. O número de pessoas desabrigadas se baseia em informações locais de eventos passados. Assim, o número médio de pessoas desabrigadas em função da área analisada é determinado através das informações do local de estudo e das áreas de cada zona, as quais foram estimadas por meio do sistema de

informação geográfica utilizado no estudo. Foram utilizados também dados da área de estudo disponibilizados no site da prefeitura do local de estudo.

Etapa 6 - Calcular as perdas esperadas

Essa etapa corresponde a etapa 7 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Como consequência natural, para cada dimensão, a função de perda de cada zona, considerando os cenários de risco de inundação em θ, pode ser calculada, conforme Equação 3.6. Como mencionado, uma função de perda significa o valor esperado da utilidade combinando a função de consequência e a função de utilidade.

Etapas 7 e 8 - Quantificar o risco global e Priorizar o risco

Essa etapa corresponde as etapas 9 e 11 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

A combinação das funções utilidade multiatributo e a função densidade de probabilidade das consequências resultou nos riscos unidimensionais, conforme Equação 3.7, podendo então ser estimada uma medida de risco multidimensional, sob a perspectiva da teoria da decisão e da teoria da utilidade.

O modelo quantifica o risco de múltiplos atributos de uma alternativa Z_n, conforme Equação 3.9, contudo, é necessário obter os valores das constantes da escala para agregar os riscos unidimensionais em um risco global. Em geral, esse processo leva em consideração as escolhas entre consequências determinísticas e loterias com probabilidades específicas em relação aos melhores e aos piores pagamentos.

Diante disto, foram obtidas as constantes de escala ($K_{c_h}, K_{c_e}, K_{c_s}$) seguindo os procedimentos de Keeney e Raiffa (1976). Assim, os valores das constantes de escalas consideradas foram 0,345, 0,234 e 0,421 respectivamente, para a consequência humana, econômica e social.

Como os atributos não violam as duas condições de independência preferenciais, conforme estabelecido por Keeney e Raiffa (1976), a agregação aditiva é permitida. Assim, o risco multiatributo de uma alternativa Z_n pode ser obtido (ver Tabela 3.4).

Tabela 3.4 - Resultado do ordenamento dos riscos da avaliação multidimensional

Ordenamento (i)	**Zonas** (Z_n)	$\mathbf{r_{global}}$	$\mathbf{r_i}(Z_n) - \mathbf{r}_{i+1}(Z_n)$	$\frac{\mathbf{r_i}(Z_n) - \mathbf{r}_{i+1}(Z_n)}{\mathbf{r}_{i+1}(Z_n) - \mathbf{r}_{i+2}(Z_n)}$
1º	Z7	7,56E-01	5,57E-04	0,034
2º	Z1	7,56E-01	1,63E-02	1,566
3º	Z6	7,39E-01	1,04E-02	4,681
4º	Z5	7,29E-01	2,23E-03	0,042
5º	Z2	7,26E-01	5,35E-02	0,146
6º	Z4	6,73E-01	3,67E-01	-
7º	Z3	3,06E-01	-	-

Fonte: A Autora (2020).

Os riscos globais das zonas foram avaliados e depois ranqueados de acordo com a prioridade dada ao risco para que o decisor possa planejar ações futuras.

O ranking de risco de inundação obtido pode não ser suficiente para uma análise satisfatória. Neste caso, o analista pode ajudar o decisor, através da interpretação das saídas do modelo. Diante disto, a modelagem propõe formas alternativas de visualizar os resultados, buscando assim apoiar a importante tarefa de mitigar essas consequências.

Sob essa perspectiva, a escala intervalar das funções de utilidade permitiu comparar os incrementos de risco em relação às áreas de risco nas posições mais baixas do ranking (Equação 3.10), melhorando a visualização desses riscos.

Analisando a Tabela 3.4, verifica-se que o maior valor dentre os valores dos riscos obtidos está localizado na zona Z7, sendo, portanto, a alternativa que recebeu a maior prioridade. Por outro lado, Z3 recebeu a menor prioridade, pois seu valor de risco global foi menor considerando o conjunto de alternativas A.

Sob a ótica de uma alocação de recursos, a zona Z7 deve ser a primeira a receber, seguida pelas zonas Z1, Z6 e Z5 que são as mais críticas. Nesse sentido, uma vez tratada a zona Z7 e havendo mais disponibilidade de recursos, esses recursos podem ser aplicados nas demais zonas seguindo a ordem decrescente do risco definido na Tabela 3.4 (Coluna 1).

Deve-se ressaltar que zonas em posições de menor prioridade não apresentam necessariamente riscos baixos para a população. De modo geral, uma alternativa pode ter risco

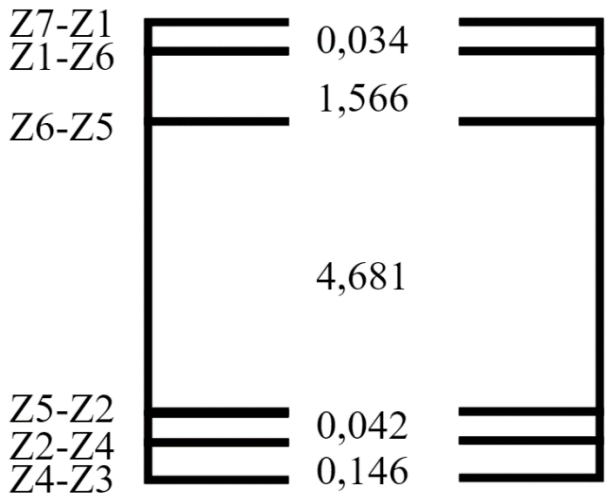
considerável, mas ser colocada em uma posição mais baixa, haja vista que outras apresentaram valores mais altos de risco.

Diante disso, a importância de se realizar outro tipo de análise, visto que a metodologia permite fazer comparações dos incrementos de riscos (Coluna 5), ao examinar a diferença entre os riscos (Coluna 4), tal que os resultados são dados numa escala intervalar em virtude da função utilidade.

Portanto, a partir da Tabela 3.4, observa-se que a diferença entre o risco (utilidade) associado a alternativa Z6 e a alternativa Z5 é de 1,04E-02, enquanto a diferença entre o risco associado a alternativa Z5 e a alternativa Z2 é de 2,23E-03. Isso quer dizer que um incremento nos valores de risco da alternativa Z6 para a Z5 é aproximadamente 4,7 vezes maior que o incremento dos valores do risco da alternativa Z5 para a Z2.

A análise do incremento do risco é importante para que o gradiente do crescimento do risco entre as alternativas forneça informações úteis que possam ser usadas no gerenciamento de inundação. Além das razões das diferenças de riscos mostradas na Tabela 3.4, visualizações gráficas, como ilustrado na Figura. 3.6, podem ajudar o decisor a formular uma análise crítica dos resultados.

Figura 3.6 - Exibição gráfica das razões das diferenças de riscos



Fonte: A Autora (2020).

Tendo em vista que os recursos são escassos, a análise do incremento do risco pode ser uma informação adicional que o decisor deve usar para implementar medidas de mitigação nas zonas estudadas. Portanto, a visualização gráfica obtida através da análise dos incrementos de risco (Figura 3.6), mostra como essa análise pode auxiliar o decisor a tomar a decisão correta.

Adicionalmente, são exploradas ferramentas de visualização de riscos multicritério a fim de aumentar a percepção do decisor sobre o risco envolvido no problema. Portanto, o modelo aplica análise gráfica das razões das diferenças de riscos dada pela Equação 3.10, como também uma análise espacial e visual usando técnicas SIG.

Etapa 9 - Desenvolver ações de mitigação para o controle de danos

Essa etapa corresponde a etapa 12 do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Uma vez realizada a avaliação de quais riscos de inundação são prioritários na área urbana, em seguida, um plano de monitoramento pode ser implementado para projetar, planejar e executar ações estratégicas que ajudarão o decisor a mitigar o impacto de tais inundações e, portanto, os danos que isso pode causar.

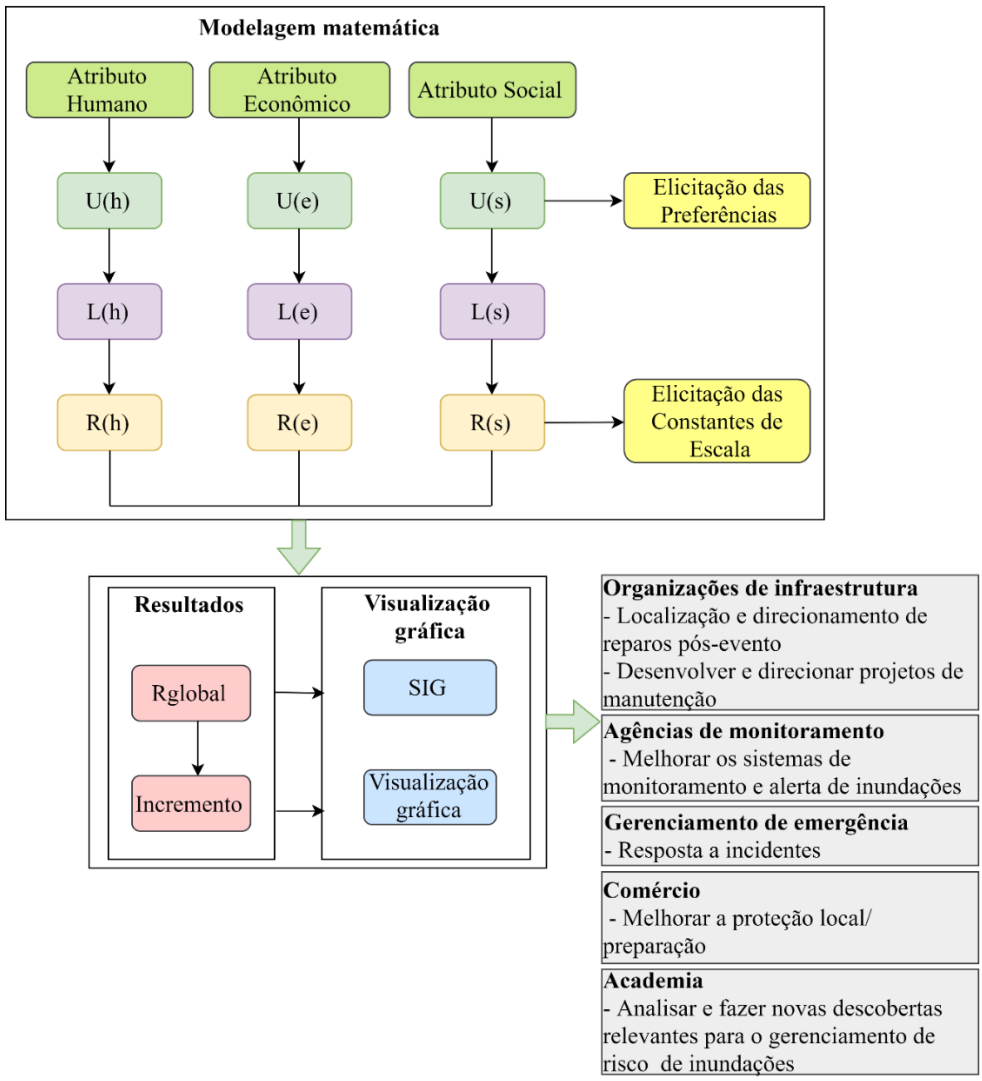
Esta etapa envolve a participação conjunta de partes interessadas no processo de tomada de decisão, que utilizam as informações fornecidas pelo modelo proposto para melhorar os procedimentos de gerenciamento de inundações, tais como de alocação de recursos e elaboração projetos de manutenção para áreas afetadas por inundações.

Por fim, foi conduzida uma análise de sensibilidade para verificação da robustez do modelo, onde foram verificados resultados satisfatórios baseados nos dados e parâmetros considerados, garantindo assim ao decisor a recomendação proposta.

3.4 Análise espacial dos resultados

O modelo fornece ao tomador de decisão uma melhor percepção da situação de risco, podendo a informação gerada ser inserida em um SIG a fim de subsidiar o processo decisório. Portanto, os riscos são o *input* para a integração do modelo matemático com SIG, possibilitando a obtenção de mapas de risco de inundação. Essa integração do modelo matemático com o SIG pode ser melhor entendida através da Figura 3.7. Nota-se que o *output* do modelo proposto, é, portanto, utilizado como *input* no SIG.

Figura 3.7 – Esquema resumo do modelo proposto



Fonte: A Autora (2020).

Como pode ser observado na Figura 3.7, o SIG tem o papel de traduzir a informação ordinal obtida na Tabela 3.4 por meio de visualização gráfica. Portanto, não é a sua proposta mostrar o quanto um risco é maior que o outro, e sim mostrar através de um degradê de cores a relação da ordenação que eles têm.

Por isso a ferramenta do SIG é importante, pois o *output* da modelagem descrita explora ferramentas de visualização de riscos multicritério para aumentar a percepção do decisor sobre o risco envolvido no problema. Assim, o modelo aplica uma análise espacial e visual usando técnicas SIG, bem como uma análise gráfica da razão de incrementos como mostrado na Figura 3.6.

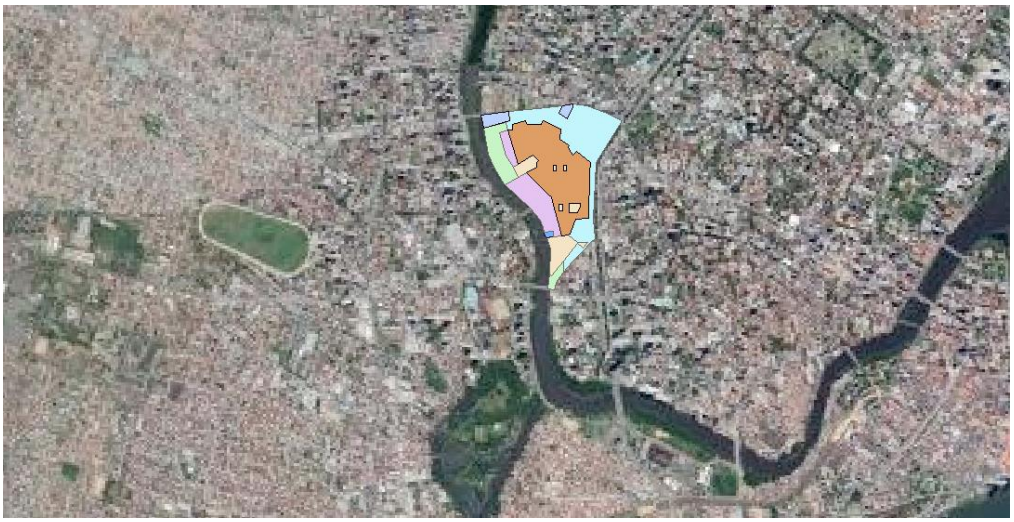
Pode-se notar ainda no esquema resumo da Figura 3.7 que muitas partes interessadas no processo de tomada de decisão usam as informações fornecidas pelo modelo proposto para melhorar os procedimentos de gerenciamento de inundações.

Diante do exposto, para que sejam gerados os mapas de risco de inundação, inicialmente um modelo hidrodinâmico é utilizado para gerar a mancha de inundação e com os resultados da simulação hidrodinâmica, é possível realizar o mapeamento da planície de inundação no SIG, viabilizando a avaliação de quais pontos do local de estudo são atingidos pelas inundações.

No SIG, foi utilizado um Modelo Digital do Terreno (MDT) obtido por meio de satélite, a fim de representar o comportamento da planície de inundação na superfície terrestre do local de estudo.

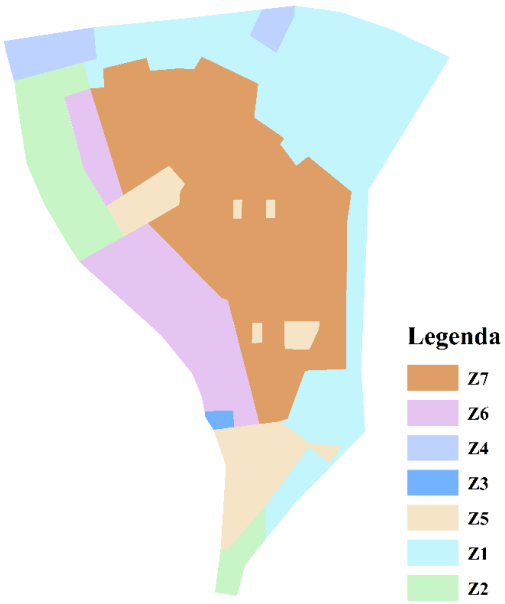
Sob essa perspectiva, foram elaborados mapas de risco para avaliar o risco de inundação em cada zona. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram o local de estudo e suas respectivas zonas. As zonas foram descritas anteriormente na Tabela 3.2.

Figura 3.8 - Local de estudo



Fonte: A Autora (2020).

Figura 3.9 - Zonas do local de estudo



Fonte: A Autora (2020).

A Figura 3.9 foi elaborada com base no mapa de zoneamento urbano do município do Recife.

Para este estudo, a mancha de inundação foi gerada considerando apenas um tempo de retorno (TR), que é definido como o período em que uma dada chuva pode ocorrer ou ser superada em anos (NETTO; FERNANDEZ, 2015). Nesse sentido, esse TR corresponde a um evento extremo de inundação, tal que representa bem os altos impactos nas dimensões consideradas. Assim, foi obtida a vazão de pico através do método do hidrograma unitário, que é um método tradicional para transformação de chuva em vazão. Em seguida, foi gerado um mapa de extensão de inundação para o local de estudo (ver Figura 3.10).

Figura 3.10 - Mapa de inundação para o estudo de caso

Fonte: A Autora (2020).

No que concerne a Figura 3.10, a imagem do local de estudo foi obtida pelo Google Earth e a mancha de inundação foi gerada com subsídio de um software de modelagem hidrodinâmica.

Sob esta ótica, o *output* gerado do modelo multicritério proposto é utilizado como *input* no SIG, de tal forma que os resultados obtidos do modelo são utilizados para alimentar os atributos de objetos georeferenciados do sistema de informação geográfica, assim o resultado obtido é um mapa de risco de inundação.

Inicialmente, foram elaborados mapas de risco unidimensionais, no qual foi utilizado um gradiente de cores conforme o aumento do risco, ou seja, cores mais "quentes" (ou maior tonalidade) representam zonas onde há maior prioridade de risco de inundação, já cores mais "frias" (ou menor tonalidade) representam alternativas onde há menor prioridade de risco de inundação. Da mesma forma, um gradiente de cores é usado no mapeamento multiatributo, tal que as alternativas em vermelho são de maior prioridade do que as alternativas em verde. Vale ressaltar que não há classificação de alternativas, mas uma ordenação delas de acordo com a avaliação de risco.

Tendo isso em vista, observa-se o risco global de inundação da área de estudo (conforme Figura 3.11), no qual a zona Z7 se apresenta mais crítica e a zona Z3 menos crítica. Esse fato se justifica, uma vez que a zona Z7 é caracterizada como uma região de alta ocupação urbana e maior extensão territorial, podendo apresentar um maior número de fatalidades e de pessoas que precisam deixar suas casas diante de um evento severo de inundação. Por outro lado, a zona Z3, é caracterizada pela presença de espaços históricos em uma área limitada, possuindo menor circulação de pessoas que as outras zonas.

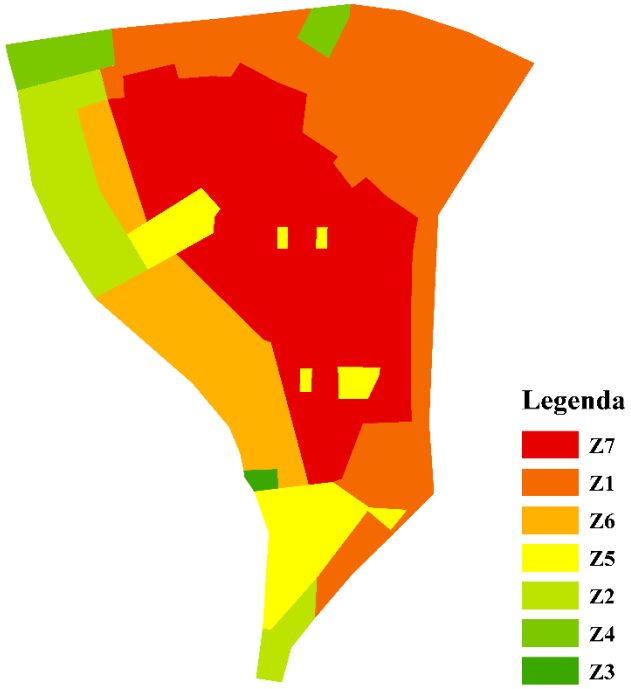
Tendo em vista o ordenamento em hierarquia de risco das demais zonas analisadas, observa-se que as zonas Z1 e Z6 também se apresentam mais prioritárias, sendo a primeira caracterizada por grande concentração habitacional e a segunda por espaços inseridos na malha urbana, localizada nas margens do rio, podendo este ser um indício que essa zona pode ser menos preparada para lidar com os impactos advindos da inundação do que as zonas circunvizinhas.

Uma análise trivial poderia indicar que o capital disponível deveria ser destinado as zonas mais próximas ao rio, uma vez que estas são as primeiras as serem tomadas em um evento de inundação. Contudo, sob uma análise multidimensional, ou seja, considerando a integração das dimensões humana, econômica e social, o modelo fornece uma análise diferenciada, que pode

auxiliar o decisor em uma alocação de recursos mais eficiente para zonas mais críticas, como por exemplo, as zonas Z7 e Z1.

Isso quer dizer que o ganho agregado quando se implementa um projeto para mitigar eventos de inundação em Z7e Z1, é maior do que implementar em Z3, Z4 e Z2. Ainda que essas zonas menos prioritárias estejam as margens do rio e sejam as primeiras a serem atingidas com o seu transbordamento, os impactos são menos significativos que em outras zonas.

Figura 3.11 - Risco global de inundação



Fonte: A Autora (2020).

Diante dos mapas de risco global, que agrega todos os mapas em um único mapa de múltiplos atributos, (Figura 3.11) e da mancha de inundação (Fig. 3.10), a relação implícita que se pode ter é que quanto maior a mancha de inundação, maior o impacto, mas geralmente não é assim, pois este impacto depende de alguns fatores, tais como nível de infraestrutura da população, seu nível de conscientização, se existem rotas de evacuação, sistema de alerta, serviços de emergência, entre outros.

A análise que deve ser feita não é pura e simplesmente a relação entre a mancha de inundação e o impacto, pois essa relação direta existe, contudo, os modelos hidrodinâmicos não abordam o ambiente multidimensional. Portanto, o uso de métodos MCDM podem fornecer informações a mais que o modelo hidrodinâmico não é capaz de traduzir.

Nesse sentido, vale salientar que não se trata de uma comparação entre os modelos, pois o modelo hidrodinâmico é adequado para sua análise, bem como o modelo multicritério

também, mas analisando o contexto de decisão, o modelo multidimensional pode traduzir as alternativas em termos de priorização de maneira mais clara, a partir dos eventos hidrodinâmicos.

Portanto, o modelo hidrodinâmico foi inserido através da mancha de inundação apenas a título de visualização, mostrando para o decisor o tipo de relação entre mancha de inundação e o impacto provocado pela mesma.

Diante do exposto, foram gerados mapas de risco para avaliar o risco de inundação em cada zona, ou seja, os mapas representam os riscos unidimensionais calculados pela Equação 3.7 (ver Figuras 3.12, 3.13 e 3.14). Verifica-se que cada dimensão de consequência apresenta uma ordenação distinta do risco global, bem como das demais dimensões. Isto se justifica pelo fato que em cada dimensão de consequência são considerados fatores que podem contribuir de maneiras distintas.

No que tange a dimensão humana, diversos fatores podem influenciar a perda de vidas humanas durante as inundações, como por exemplo, ausência de sistemas de alerta para a população, ausência de abrigos, colapso de edifícios vulneráveis e de baixa qualidade em que as pessoas estão abrigadas, existência de população mais vulnerável como crianças e idosos, baixo nível de conscientização da população residente em relação aos resíduos sólidos descartados de maneira inadequada, bloqueando os sistemas de drenagem de água, construção de residências em áreas vulneráveis, existência de rotas de evacuação, existência de equipes de resgate, entre outros.

Nesse contexto, verifica-se sob uma análise de risco na dimensão humana que a zona Z7 é a mais crítica, seguida das zonas Z1, Z6 e Z2. Por outro lado, as zonas Z4 e Z3 são apresentadas como as menos críticas.

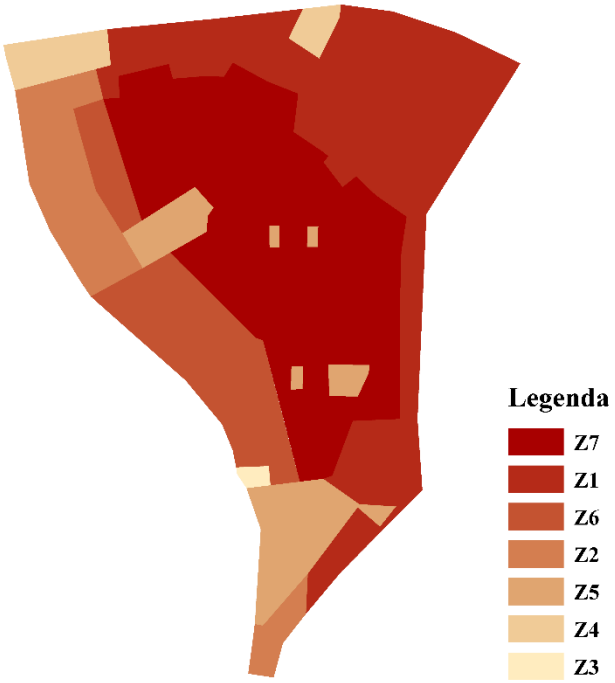
Na zona Z7, o risco está associado ao grande número de residentes nesta região, assim como na zona Z1, que apresenta um desempenho próximo ao da Z7, ainda que tenha uma menor quantidade de residentes e maior distanciamento das margens do rio.

A zona Z6, uma região caracterizada por prédios públicos e alta circulação de pessoas, além de localizada as margens do rio, pode apresentar exposição aos efeitos da água previamente, enquanto comparado a zonas mais distantes, indicando um menor tempo para evacuar a área e consequentemente, uma maior probabilidade de haver consequências humanas.

Por fim, as zonas Z3 e Z4, também localizada as margens do rio, se apresentam em situação menos crítica que as demais regiões, sendo isto devido à menor densidade populacional

da região, visto que estas zonas são compostas por edifícios históricos e isolados, significando a exposição de um menor número de indivíduos.

Figura 3.12 - Risco sobre a dimensão humana de inundação



Fonte: A Autora (2020).

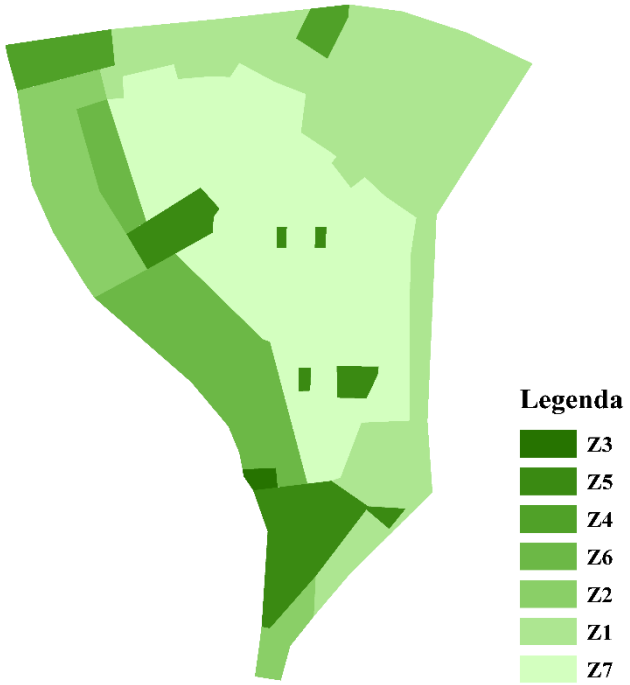
No que se refere a dimensão econômica, os danos físicos as edificações podem ser influenciados pelo padrão construtivo das edificações, considerando por exemplo, condições de acabamento e a qualidade dos materiais empregados, o número de pavimentos e a existência de pavimentos especiais (subsolo, pilotis etc.), entre outros.

A Figura 3.13 apresenta o risco sobre a dimensão econômica, na qual se verifica que a zona Z3 é a mais crítica, seguida pelas zonas Z5 e Z4. Nesse sentido, o impacto sobre a zona Z3, que é composta por edifícios históricos, reconhecidos por sua relevância a cultura nacional, se apresenta mais prioritária, dada a infraestrutura nessa zona que pode não abarcar os impactos.

O impacto sobre a zona Z5, que é composta por edificações pública e privada, diante da ocorrência de impactos sobre a mesma, implica na interrupção de serviços prestados a sociedade. Portanto, a fim de evitar a interrupção de tais serviços à população, o foco de ataque no desenvolvimento de um plano para evitar impactos econômicos nesta zona é mais crítico do que em Z7 ou Z1.

Por fim, a zona Z7 é apresentada como a menos crítica, uma vez que o dano por unidade de área desta zona é menor que nas demais, ou seja, há uma probabilidade menor de apresentar danos, dada a infraestrutura nesta zona que pode abarcar e amenizar os impactos econômicos.

Figura 3.13 - Risco sobre a dimensão econômica de inundação



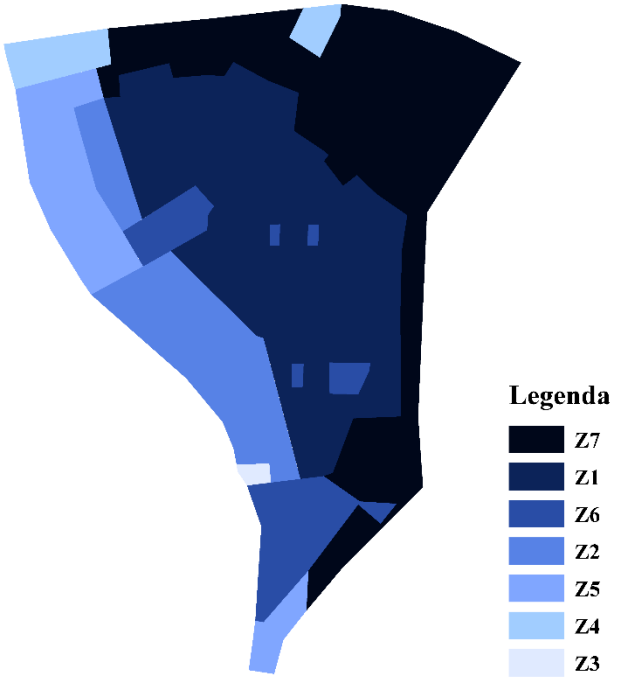
Fonte: A Autora (2020).

Quanto à dimensão social, alguns fatores podem influenciar no número de desabrigados, como por exemplo, a qualidade dos materiais empregados na construção das edificações, a idade dos imóveis, a área construída, entre outros.

A Figura 3.14 apresenta o risco sobre a dimensão social, na qual se verifica que a zona Z1 é a mais crítica, seguida pela zona Z7. Isso se justifica pelo fato dessas zonas possuírem mais edificações residenciais por unidade de área que as demais zonas. Sob essa ótica, a zona Z1 ganha destaque por apresentar a maior densidade populacional, devido a sua verticalização, representando que o impacto em uma edificação desse tipo pode afetar mais domicílios do que uma construção horizontal. Já a zona Z7, apresenta-se menos densa devido a sua horizontalidade, enquanto a Z4 apresenta uma concentração ainda menor de edifícios, visto que esta zona é caracterizada por propriedades isoladas, conjuntos e sítios.

Por fim, a zona Z3, caracterizada por possuir apenas edificações de importante significado histórico e cultural, possui o menor risco sobre a dimensão de consequência social, visto que não existem residências na área.

Figura 3.14 - Risco sobre a dimensão social de inundação



Fonte: A Autora (2020).

Portanto, um resumo do resultado do ordenamento dos riscos das avaliações unidimensionais, bem como da avaliação multidimensional dos riscos é apresentada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Ordenamento dos riscos das avaliações unidimensionais e multidimensional

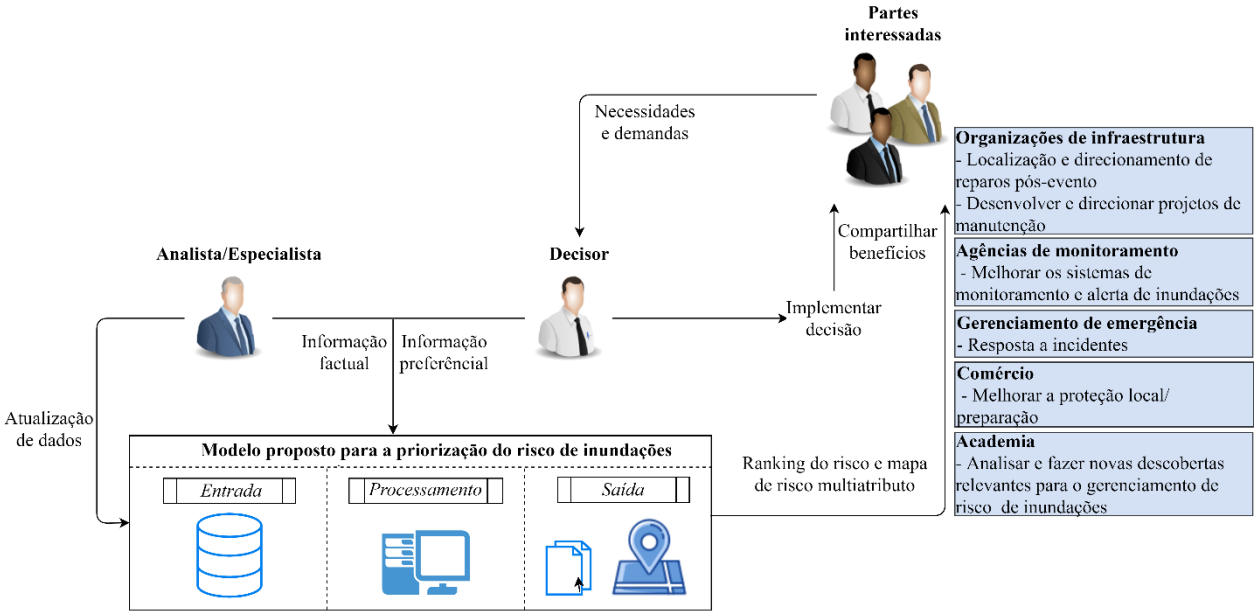
	Dimensão Humana	**Dimensão Econômica**	**Dimensão Social**	**Avaliação multidimensional do risco de inundação**
Ordenamento	**Zonas**			
1º	Z7	Z3	Z1	Z7
2º	Z1	Z5	Z7	Z1
3º	Z6	Z4	Z5	Z6
4º	Z2	Z6	Z6	Z5
5º	Z5	Z2	Z2	Z2
6º	Z4	Z1	Z4	Z4
7º	Z3	Z7	Z3	Z3

Fonte: A Autora (2020)

Portanto, nota-se a importância de considerar cada dimensão de consequência na geração da medida de risco de multidimensional, que forma um ordenamento em hierarquia de risco das diversas zonas analisadas, servindo como *input* para o processo de gerenciamento de risco de inundações urbanas. Desse modo, o modelo proposto utiliza a medida de risco multidimensional, agregando não somente as perdas sobre o homem, mas também as perdas nas dimensões econômicas e sociais, beneficiando o decisor na tomada de decisão.

Sob essa ótica, uma interpretação crítica dos resultados do modelo contribui para o gerenciamento de risco de inundações, haja vista que as informações obtidas direcionam o decisor para uma melhor decisão estratégica relacionada à área urbana em análise. Adicionalmente, as partes interessadas no processo de tomada de decisão podem utilizar as informações fornecidas pelo modelo proposto para melhorar os procedimentos de gerenciamento de inundações em áreas urbanas (ver Figura 3.15).

Figura 3.15 – Processo de interação entre os possíveis atores envolvidos a partir do modelo proposto para o gerenciamento de risco de inundação em áreas urbanas



Fonte: A Autora (2020).

A Figura 3.15 apresenta de maneira geral, como ocorre a interação entre os atores envolvidos no gerenciamento de risco, bem como a interação desses com o modelo, mostrando por fim como a modelagem proposta pode beneficiar todos os envolvidos. Assim, verifica-se que as partes interessadas podem interagir com o decisor, contribuindo com conhecimento e colocando suas necessidades e demandas, exercendo assim algum tipo pressão sobre ele. O

decisor deve compreender quais são os principais objetivos com a aplicação do modelo, representando as preferências dos profissionais envolvidos na mitigação de inundações. Já os analistas e especialistas devem contribuir com informações factuais do problema para que seja possível avaliar com clareza o ambiente multidimensional e a metodologia envolvida no processo. Em seguida, essas informações são processadas e obtém-se como resposta da modelagem proposta um ranking de risco de inundação e um mapa de risco multiatributo da área estudada. A partir disto, o decisor pode realizar uma análise aprofundada do leque de possibilidades, como resultado de quais alternativas podem ser escolhidas para implementar ações preventivas e mitigadoras, beneficiando a comunidade urbana.

Diante dessas considerações, a análise disponibilizada através do modelo proposto possibilita que setores de infraestrutura desenvolvam e melhorem projetos de manutenção e o direcionem de projetos de reparos pós-eventos, que agências de monitoramento melhorem sistemas de monitoramento e alerta de inundações, que empresas melhorem a proteção local aprimorando a resiliência a inundações, que órgãos de gerenciamento de emergência melhorem a preparação para resposta a incidentes e que comunidades científicas façam novas descobertas para o gerenciamento de risco de inundação.

Portanto, a abordagem multicritério para avaliação de riscos se mostra muito relevante, pois considera os vários impactos das inundações sobre o funcionamento dos espaços urbanos. A modelagem contribui na prática para reduzir o risco de desastres de maneira eficiente e para compartilhar benefícios com todas as partes interessadas da área urbana, fornecendo recomendações coerentes, a fim de aumentar a percepção do risco e reduzir a vulnerabilidade.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo encerra a dissertação, apresentando conclusões sobre os resultados encontrados, bem como limitações e sugestões para trabalhos futuros.

4.1 Conclusões

As inundações em áreas urbanas estão se tornando mais frequentes e severas, podendo causar altos impactos. Nesse cenário, o gerenciamento do risco de inundações desempenha um papel crítico na implementação de estratégias para prevenir e mitigar desastres.

Tendo em vista o contexto multidimensional do problema, o presente trabalho apresentou um modelo de múltiplos atributos para avaliação de risco de inundação em áreas urbanas considerando três dimensões de consequência: impactos sobre os humanos, impactos econômicos e impactos sociais.

O modelo proposto contribui para o estado da arte considerando aspectos probabilísticos, integrando, assim, as abordagens MAUT e Teoria da Decisão, em uma metodologia dividida em 9 etapas.

O modelo fornece suporte ao decisor para a priorização das alternativas, possibilitando que os recursos do gerenciamento de risco sejam geridos e alocados primeiramente àquelas alternativas mais críticas. Portanto, quando há necessidade de se alocar recursos disponíveis, a problemática de ordenamento das diversas alternativas torna-se a mais adequada, uma vez que o modelo proposto permite que o decisor faça uma lista hierárquica de riscos do conjunto formado pelas zonas que compreendem a área urbana em estudo. Assim, os recursos disponíveis podem ser alocados de acordo com as alternativas que se encontram no topo da lista até que todos os recursos sejam consumidos.

A aplicação numérica demonstrou a aplicabilidade do modelo. Nesse sentido, a proposta de modelagem difere das práticas atuais, haja vista que considera a incerteza neste processo de decisão e estima cenários de risco e funções de consequência. Além disso, procura modelar as preferências do decisor matematicamente, considerando diferentes critérios que frequentemente conflitam entre si, além da análise dos incrementos de risco.

Diante dessa análise, o decisor é capaz de obter uma visão mais detalhada do risco em relação as zonas consideradas no estudo de caso, com um melhor direcionamento quanto à alocação de recursos disponíveis para a adoção de ações preventivas e mitigadoras para um conjunto de alternativas próximas ao topo da lista, visando o atendimento das metas em cada

dimensão de consequência para cada alternativa, na qual fornece um melhor retorno sobre a redução do risco multidimensional. Deste modo, essas considerações tornam este modelo uma importante ferramenta para a tomada de decisão.

Adicionalmente, o modelo inclui a visualização gráfica e o mapeamento de áreas de risco de vários atributos, sendo estes mapas gerados através de um SIG que atuou como ferramenta suplementar para contribuir com o processo decisório, apresentando ao decisor o tipo de relação entre mancha de inundação e o impacto provocado por ela, e auxiliando na adoção de ações para a redução dos impactos das inundações, como por exemplo, construção de reservatórios, obras de dragagem e zoneamento da planície de inundação.

Neste contexto, os mapas de risco gerados através da integração dos resultados obtidos no modelo proposto e o SIG contribuem para a tomada de decisão. Isso ocorre dado que o SIG fornece uma riqueza de informações que podem apoiar o decisor no final do processo, enquanto que quando modelos puramente matemáticos falham, eles falham em sua totalidade. Assim, as ferramentas de visualização de riscos não apenas aumentam a credibilidade do modelo proposto, mas também garantem que todos os atores entendam corretamente as particularidades do problema de decisão. Além disso, o modelo é flexível, podendo ser replicado em outros centros urbanos, através das considerações das características locais.

Portanto, a modelagem proposta fornece uma ampla gama de informações extremamente úteis para o gerenciamento de risco de inundações que podem ser usadas para melhorar decisões estratégicas relacionadas à área urbana. A implementação desse modelo na prática contribui para o diagnóstico da resiliência dos espaços urbanos, haja vista que a análise multicritério pode fornecer recomendações equilibradas e coerentes para aumentar a percepção do risco e reduzir a vulnerabilidade.

4.2 Limitações e Sugestões para Trabalhos Futuros

Como limitações deste estudo, podem ser destacadas:

a) Ausência de dados que possibilitem a avaliação do impacto econômico sob alguns aspectos, tais como, interrupção dos serviços públicos, perdas de produção para empresas (por exemplo, fornecedores de empresas inundadas), custo de interrupção do tráfego, perda de receita tributária devido à migração de empresas após as inundações, entre outros;
b) A falta de dados que permita uma quantificação de impactos diretos e intangíveis, tais como, efeitos negativos nos ecossistemas e doentes pelo contato com a água;

c) Tendo em vista um acréscimo substancial de complexidade do problema, caso fosse realizada a avaliação do sofrimento psicológico, este aspecto não foi mensurado na avaliação de impactos indiretos e intangíveis.
d) Restrições computacionais para rodar o modelo digital de elevação (MDT) fornecido pela prefeitura do local de estudo, resultando em uma simulação hidrodinâmica menos detalhada;
e) A resolução dos MDT's disponibilizados gratuitamente na internet não permite distinguir entre o topo de edificações e o terreno. Portanto, a precisão dos dados topográficos disponibilizados não é a melhor, e consequentemente, a qualidade do MDT utilizado não é a melhor também.

Diante das várias considerações, algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser feitas, destacando-se:

a) Incorporação de outras dimensões ao modelo, a fim de mostrar um panorama mais completo do risco de inundação;
b) Consideração da existência de medidas estruturais como barragens e diques, bem como seus modos de falha em potencial;
c) Incorporação dos efeitos das mudanças climáticas nas áreas urbanas;
d) Consideração da influência da maré;
e) Desenvolvimento de uma ferramenta computacional SAD (Sistema de Apoio à Decisão), para gerir informações e fornecer conhecimento para o processo de tomada de decisão, proporcionando mais dinamismo ao modelo para acompanhar as mudanças nas características das zonas e obtendo feedback das ações preventivas e mitigadoras já implementadas, melhorando continuamente o gerenciamento de risco através do seu fomento;
f) Consideração da tomada de decisão em grupo, podendo agregar diferentes perspectivas do problema.

REFERÊNCIAS

AHMADISHARAF, E.; KALYANAPU, A. J.; CHUNG, E. S. Evaluating the Effects of Inundation Duration and Velocity on Selection of Flood Management Alternatives Using Multi-Criteria Decision Making. *Water Resources Management*, v. 29, n. 8, p. 2543–2561, 2015.

AHMADISHARAF, E.; KALYANAPU, A. J.; CHUNG, E. S. Spatial probabilistic multi-criteria decision making for assessment of flood management alternatives. *Journal of Hydrology*, v. 533, p. 365–378, 2016.

AHMADISHARAF, E.; KALYANAPU, A. J.; CHUNG, E. S. Sustainability-based flood hazard mapping of the Swannanoa River watershed. *Sustainability (Switzerland)*, v. 9, n. 10, p. 1–15, 2017.

AHMADISHARAF, E.; TAJRISHY, M.; ALAMDARI, N. Integrating flood hazard into site selection of detention basins using spatial multi-criteria decision-making. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 59, n. 8, p. 1397–1417, 2016.

ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. Assigning priorities to actions in a pipeline transporting hydrogen based on a multicriteria decision model. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 35, n. 8, p. 3610–3619, 2010.

ALFIERI, L.; FEYEN, L.; DI BALDASSARRE, G. Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. *Climatic Change*, v. 136, n. 3–4, p. 507–521, 2016.

ALMEIDA, A. T. *O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão*. 2. ed., re ed. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011. p. 234.

ARABAMERI, A.; PRADHAN, B.; REZAEI, K.; CONOSCENTI, C. Gully erosion susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques. *Catena*, v. 180, n. September 2018, p. 282–297, 2019a.

ARABAMERI, A; REZAEI, K.; CERDÀ, A.; CONOSCENTI, C.; KALANTARI, Z. A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of the Total Environment*, v. 660, p. 443–458, 2019b.

ARYANPUR, V.; ARABAKI, M. S.; MARZBAND, M.; SIANO, P.; GHAYOUMI, K. An overview of energy planning in Iran and transition pathways towards sustainable electricity supply sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 112, n. May, p. 58–74, 2019.

AVEN, T. A risk concept applicable for both probabilistic and non-probabilistic perspectives. *Safety Science*, v. 49, n. 8–9, p. 1080–1086, 2011.

AVEN, T. The risk concept-historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 99, n. 0951, p. 33–44, 2012.

BANA E COSTA, C. A.; ANTÃO DA SILVA, P.; NUNES CORREIA, F. Multicriteria evaluation of flood control measures: The case of Ribeira do Livramento. *Water Resources Management*, v. 18, n. 3, p. 263–283, 2004.

BERGER, J. O. *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1985.

BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T. Multi-attribute risk assessment for risk ranking of natural

gas pipelines. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 94, n. 2, p. 187–198, 2009.

BROUWER, R.; VAN EK, R. Integrated ecological, economic and social impact assessment of alternative flood control policies in the Netherlands. *Ecological Economics*, v. 50, n. 1–2, p. 1–21, 2004.

CASTILLO-RODRÍGUEZ, J. T.; ECUDER-BUENO, I.; ALTAREJO-GARCÍA, L.; SERRANO-LOMBILLO, A. The value of integrating information from multiple hazards for flood risk analysis and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, n. 2, p. 379–400, 2014.

CASTRO, A.L.C. *Glossário de Defesa Civil, Estudos de Riscos e Medicina de Desastres*. Brasília: MP, 1998. Disponível em: www.defesacivil.mg.gov.br › manuais › GLOSSARIO-Dicionario-Defesa-Civil. Acesso em: 13/10/2019.

CHANG, N. BIN; PARVATHINATHAN, G.; BREEDEN, J. B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, v. 87, n. 1, p. 139–153, 2008.

CHEN, Y. R.; YEH, C. H.; YU, B. Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan. *Natural Hazards*, v. 59, n. 3, p. 1261–1276, 2011.

CHEN, Y.; LIU, R.; BARRETT, D.; GAO, L.; ZHOU, M.; RENZULLO, L.; EMELYANOVA, I. A spatial assessment framework for evaluating flood risk under extreme climates. *Science of the Total Environment*, v. 538, p. 512–523, 2015.

CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation. *Environmental Modelling and Software*, v. 25, n. 12, p. 1582–1591, 2010.

CHITSAZ, N.; BANIHABIB, M. E. Comparison of Different Multi Criteria Decision-Making Models in Prioritizing Flood Management Alternatives. *Water Resources Management*, v. 29, n. 8, p. 2503–2525, 2015.

CHOU, J. S.; YANG, I. T.; CHONG, W. K. Probabilistic simulation for developing likelihood distribution of engineering project cost. *Automation in Construction*, v. 18, n. 5, p. 570–577, 2009.

CRED-UNISDR. The human cost of weather related disasters*: 1995-2015, Brussels*, 2015.

CURTO, J. J.; CASTELL, J.; DEL MORAL, F. Sfe: Waiting for the big one. *Journal of Space Weather and Space Climate*, v. 6, 2016.

DA SILVA, L. B. L.; HUMBERTO, J. S.; LIMA, L. E. S.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, J. A.; and DE ALMEIDA, A.T. Multicriteria Modelling For Managing Flood Risks In Urban Areas. *29th European Safety and Reliability Conference*. Welfenschloss, 2019.

DA SILVA, L. B. L.; PALHA, R. P.; ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. A multidimensional risk evaluation framework for managing floods in urban areas. *Safety and Reliability - Safe Societies in a Changing World - Proceedings of the 28th International European Safety and Reliability Conference, ESREL 2018*, p. 2763–2770, 2018.

DANG, N. M.; BABEL, M. S.; LUONG, H. T. Evaluation of food risk parameters in the Day River Flood Diversion Area, Red River Delta, Vietnam. *Natural Hazards*, v. 56, n. 1, p. 169–194, 2011.

DE ALMEIDA, A. T; SOUZA, F. M. C. (EDS.). *Gestão da Manutenção na Direção da Competitividade.* Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001.

DE ALMEIDA, A. T. *Processo de Decisão nas Organizações: construindo modelos de decisão multicritério*. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 2013.

DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C.A.V.; ALENCAR, H. A.; FERREIRA, R.J.P.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T.; GARCEZ, T.V. *Multicriteria and Multiobjective Models for Risk, Reliability and Maintenance Decision Analysis*. New York: Springer, 2015.

DE ALMEIDA, A. T.; ALENCAR, M. H.; GARCEZ, T. V.; FERREIRA, R. J. P. A systematic literature review of multicriteria and multi-objective models applied in risk management. *IMA Journal of Management Mathematics*, v. 28, n. 2, p. 153–184, 2017.

DE BRITO, M. M.; EVERS, M. Multi-criteria decision-making for flood risk management: A survey of the current state of the art. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 16, n. 4, p. 1019–1033, 2016.

DE BRITO, M. M.; EVERS, M.; HÖLLERMANN, B. Prioritization of flood vulnerability, coping capacity and exposure indicators through the Delphi technique: A case study in Taquari-Antas basin, Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 24, n. May, p. 119–128, 2017.

DE MOEL, H.; JONGMAN, B.; KREIBICH, H., MERZ, B. PENNING-ROWSELL, E.; WARD, P. J. Flood risk assessments at different spatial scales. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 20, n. 6, p. 865–890, 2015.

EM-DAT/ CRED (2019). Disponível em: https://www.emdat.be/. Acessado em: 14/01/2020.

ENGINEERS;, P. A. OF C. Technical Guides on Dam Safety. *Risk Analysis Applied to Management of Dam Safety*, v. 1, [s.d.].

ESTEVES, L. S. Consequences to flood management of using different probability distributions to estimate extreme rainfall. *Journal of Environmental Management*, v. 115, p. 98–105, 2013.

FERNÁNDEZ, D. S.; LUTZ, M. A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, v. 111, n. 1–4, p. 90–98, 2010.

FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D.; RIGHI, M. B.; DE ALMEIDA-FILHO, A. T. A fuzzy hybrid integrated framework for portfolio optimization in private banking. *Expert Systems with Applications*, v. 92, p. 350–362, 2018.

FEYEN, L.; DANKERS, R.; BÓDIS, K.; SALAMON, P.; BARREDO, J.I. Fluvial flood risk in Europe in present and future climates. *Climatic Change*, v. 112, p. 47–62, 2012.

FLOODSITE. Flood risk assessment and flood risk management. *Measurements*, p. 1–139, 2009.

GIGOVIĆ, L.; PAMUCAR, D.; BAJIC, Z.; DROBNJAK, S. Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas. *Water (Switzerland)*, v. 9, n. 6, p. 1–26, 2017.

HAASE, D. Participatory modelling of vulnerability and adaptive capacity in flood risk management. *Natural Hazards*, v. 67, n. 1, p. 77–97, 2013.

HANDMER, J., Y. HONDA, Z.W. KUNDZEWICZ, N. ARNELL, G. BENITO, J. HATFIELD, I.F. MOHAMED, P. PEDUZZI, S. WU, B. SHERSTYUKOV, K. TAKAHASHI, AND Z. YAN. Changes in impacts of climate extremes: human systems and ecosystems. *In*: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. *A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, p. 231-290, 2012.

HASHEMKHANI ZOLFANI, S.; POURHOSSEIN, M.; YAZDANI, M.; ZAVADSKAS, E. K. Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework. *Alexandria Engineering Journal*, v. 57, n. 1, p. 357–365, 2018.

HUMBERTO, J. S.; DA SILVA, L.B.L.; LIMA, L.E. S.; ALENCAR, M.H.; ALMEIDA, J.A.; DE ALMEIDA, A.T. *Modelo De Apoio à Decisão Multicritério para Gestão de Riscos de Inundação em Áreas Urbanas*. LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Limeira – SP, 2019.

IPCC. Glossary of terms. In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. 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. 555-564, 2012.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

JHA, A.; BLOCH, R.; LAMOND, J. Cidades e Inundação: Um Guia para a Gestão Integrada de Inundação Urbanas para o Século XXI. *The World Bank*, p. 1–54, 2012.

JOHNSON, L.E. Geographic Information Systems in Water Resources Engineering. Florida: Taylor & Francis Group, 2009.

JONKMAN, S. N.; BOČKARJOVA, M.; KOK, M.; BERNARDINI, P. Integrated hydrodynamic and economic modelling of flood damage in the Netherlands. *Ecological Economics*, v. 66, n. 1, p. 77–90, 2008.

JONKMAN, S. N.; VRIJLING, J. K.; VROUWENVELDER, A. C. W. M. Methods for the estimation of loss of life due to floods: A literature review and a proposal for a new method. *Natural Hazards*, v. 46, n. 3, p. 353–389, 2008.

JOZAGHI, A.; ALIZADEH, B.; HATAMI, M.; FLOOD, I.; KHORRAMI, M.; KHODAEI, N.; TOUSI, E. G. A comparative study of the AHP and TOPSIS techniques for dam site selection using GIS: A case study of Sistan and Baluchestan Province, Iran. *Geosciences (Switzerland)*, v. 8, n. 12, p. 1–23, 2018.

JUN, K. S.; CHUNG, E. S.; KIM, Y. G.; KIM, Y. A fuzzy multi-criteria approach to flood risk vulnerability in South Korea by considering climate change impacts. *Expert Systems with Applications*, v. 40, n. 4, p. 1003–1013, 2013.

KADANE, J.; WOLFSON, L. J. Experiences in elicitation [Read before The Royal Statistical Society at a meeting on “Elicitation” on Wednesday, April 16th, 1997, the President, Professor A. F. M. Smith in the Chair]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, v. 47, n. 1, p. 3–19, 1998.

KAILIPONI, P. Analyzing evacuation decisions using multi-attribute utility theory (MAUT). *Procedia Engineering*, v. 3, p. 163–174, 2010.

KARLSSON, C. S. J.; KALANTARI, Z.; MÖRTBERG, U.; OLOFSSON, B.; LYON, S. W. Natural Hazard Susceptibility Assessment for Road Planning Using Spatial Multi-Criteria Analysis. *Environmental Management*, v. 60, n. 5, p. 823–851, 2017.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. *Decision with multiple objectives*: preferences and values trade-offs. New York: Cambrigde University Press, 1976.

KEENEY, R.; RAIFFA, H.; W. RAJALA, D. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Trade-Offs. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. *Proceedings...* v. 9, n. 7, p. 403, 1979.

KENNEDY, M. Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS: A Workbook Approach to Learning GIS. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.

KLIJN, F.; BRUIJN, K. M.; KNOOP, J.; KWADIJK, J. Assessment of the Netherlands' flood risk management policy under global change. *Ambio*, v. 41, n. 2, p. 180–192, 2012.

KLIJN, F.; KREIBICH, H.;DE MOEL, H.; PENNING-ROWSELL, E. Adaptive flood risk management planning based on a comprehensive flood risk conceptualisation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 20, n. 6, p. 845–864, 2015.

KOKS, E. E.; BOČKARJOVA, M.; DE MOEL, H.; AERTS, J. C. J. H. Integrated direct and indirect flood risk modeling: Development and sensitivity analysis. *Risk Analysis*, v. 35, n. 5, p. 882–900, 2015.

KOURGIALAS, N. N.; KARATZAS, G. P. Gestion des inondations et méthode de modélisation sous SIG pour évaluer les zones d'aléa inondation-une étude de cas. *Hydrological Sciences Journal*, v. 56, n. 2, p. 212–225, 2011.

KUBAL, C.; HAASE, D.; MEYER, V.; SCHEUER, S. Integrated urban flood risk assessment – adapting a multicriteria approach to a city. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., v.9, p. 1881–1895, 2009.

KUNDZEWICZ, Z. W.; KANAE, S.; SENEVIRATNE, S. I.; HANDMER, J.; NICHOLLS, N.; PEDUZZI, P.; MECHLER, R.; BOUWER, L. M.; ARNELL, N.; MACH, K.; MUIR-WOOD, R.; BRAKENRIDGE, G. R.; KRON, W.; BENITO, G.; HONDA, Y.; TAKAHASHI, K.; SHERSTYUKOV, B. Le risque d'inondation et les perspectives de changement climatique mondial et régional. *Hydrological Sciences Journal*, v. 59, n. 1, p. 1–28, 2014.

LEI Nº 17.511/2008. LeisMunicipais, 2009. Disponível em: https://leismunicipais.com.br/plano-diretor-recife-pe-2008-12-29-versao-original. Acesso em: 02/03/2020.

LEE, G.; JUN, K. S.; CHUNG, E. S. Group decision-making approach for flood vulnerability identification using the fuzzy VIKOR method. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 15, n. 4, p. 863–874, 2015.

LEE, G.; JUN, K. S.; CHUNG, E. S. Robust spatial flood vulnerability assessment for Han River using fuzzy TOPSIS with cut level set. *Expert Systems with Application***s**, v. 41, n. 2, p. 644–654, 2014.

LEVY, J. K. Multiple criteria decision making and decision support systems for flood risk management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 19, n. 6, p. 438–447, 2005.

LEVY, J. K.; HARTMANN, J.; LI, K. W.; AN, Y.; ASGARY, A. Multi-criteria decision

support systems for flood hazard mitigation and emergency response in urban watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 43, n. 2, p. 346–358, 2007.

LI, Q.; WU, H. Geo-Spatial Knowledge and Intelligence. v. 848, p. 52–59, 2018.

LIN, L.; WU, Z.; LIANG, Q. Urban flood susceptibility analysis using a GIS-based multi-criteria analysis framework. *Natural Hazards*, v. 97, n. 2, p. 455–475, 2019.

LINS, P. H. C.; DE ALMEIDA, A. T. Multidimensional risk analysis of hydrogen pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 37, n. 18, p. 13545–13554, 2012.

LIU, L.; FRANGOPOL, D. M.; MONDORO, A.; YANG, D. Y. Sustainability-Informed Bridge Ranking under Scour Based on Transportation Network Performance and Multiattribute Utility. *Journal of Bridge Engineering*, v. 23, n. 10, p. 1–12, 2018.

LOOS, J. R.; ROGERS, S. H. Understanding stakeholder preferences for flood adaptation alternatives with natural capital implications. *Ecology and Society*, v. 21, n. 3, 2016.

LUU, C.; VON MEDING, J. A flood risk assessment of Quang Nam, Vietnam using spatial multicriteria decision analysis. *Water (Switzerland)*, v. 10, n. 4, p. 1–16, 2018.

Malczewski, J. GIS and Multi-Criteria Decision Analysis; Wiley: New York, NY, USA, 1999.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: A survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006.

MARTING, E.S.; STEDINGER, J. R. Quantile Estimators for Hydrologic Data. *Water Resources*, v. 36, n. 3, p. 737–744, 2000.

MARTINS, E. S.; STEDINGER, J. R. Generalized maximum-likelihood generalized extreme-value quantile estimators for hydrologic data. *Water Resources Research*, v. 36, nº. 3, p. 737-744, 2000.

MARTZ, H. F.; WALLER, R. A. *Bayesian Reliability Analysis*. John Wiley & Sons, 1982.

MERZ, B.; AERTS, J.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; BALDI, M.; BECKER, A.; BICHET, A.; BLÖSCHL, G.; BOUWER, L. M.; BRAUER, A.; CIOFFI, F.; DELGADO, J. M.; GOCHT, M.; GUZZETTI, F.; HARRINGAN, S.; HIRSCHBOECK, K.; KILSBY, C.; KRON, W.; KWON, H.-H.; LALL, U.; MERZ, R.; NISSEN, K.; SALVATTI, P.; SWIERCZYNSKI, T.; ULBRICH, U.; VIGLIONE, A.; WARD, P. J.; WEILER, M.; WILHELM, B.; NIED, M. Floods and climate: Emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 14, n. 7, p. 1921–1942, 2014.

MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. Review article "assessment of economic flood damage". *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 10, n. 8, p. 1697–1724, 2010.

MEYER, V. HAASE, D.; SCHEUER, S. GIS-based multicriteria analysis as decision support in flood risk management. *UFZ Discussion Paper*, nº.6, 2007.

MEYER, V.; SCHEUER, S.; HAASE, D. A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards*, v. 48, n. 1, p. 17–39, 2009.

MOGHADAS, M.; ASADZADEH, A.; VAFEIDIS, A.; FEKETE, A.; KÖTTER, T. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 35, n. February, 2019.

MOSTAFAZADEH, R.; SADODDIN, A.; BAHREMAND, A.; SHEIKH, V. B.; GARIZI, A. Z. Scenario analysis of flood control structures using a multi-criteria decision-making technique in Northeast Iran. *Natural Hazards*, v. 87, n. 3, p. 1827–1846, 2017.

MUNICH RE (2017). Disponível em: https://www.munichre.com/en.html. Acessado em: 14/01/2020.

NASCIMENTO, N.; MACHADO, M. L.; BAPTISTA, M.; DE PAULA E SILVA, A. The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Urban Water Journal*, v. 4, n. 3, p. 195–210, 2007.

NASCIMENTO, K. R.S.; ALENCAR, M.H. Management of risks in natural disasters: A systematic review of the literature on NATECH events. J*ournal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.44, p.347-359, 2016.

NASIRI, H.; BOLOORANI, A. D.; SABOKBAR, A. F.; JAFARI, H. R.; HAMZEH, M.; RAFII, Y. Determining the most suitable areas for artificial groundwater recharge via an integrated PROMETHEE II-AHP method in GIS environment (case study: Garabaygan Basin, Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 185, n. 1, p. 707–718, 2013.

NETTO, A.M.J; FERNANDES, F.M. *Manual de Hidráulica*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

NYIMBILI, P. H.; ERDEN, T. Spatial decision support systems (SDSS) and software applications for earthquake disaster management with special reference to Turkey. *Natural Hazards*, v. 90, n. 3, p. 1485–1507, 2018.

OUMA, Y. O.; TATEISHI, R. Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: Methodological overview and case study assessment. *Water (Switzerland)*, v. 6, n. 6, p. 1515–1545, 2014.

PALCHAUDHURI, M.; BISWAS, S. Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India. *Natural Hazards*, v. 84, n. 3, p. 1905–1920, 2016.

PARCHURE, A. S.; GEDAM, S. K. Probability distribution analysis of extreme rainfall events in a flood-prone region of Mumbai, India. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 12, n. 11, 2019.

PARDALOS, P. M.; SISKOS, Y.; ZOPOUNIDIS. C. Advances in multicriteria analysis. *Kluwer Academic Publishers*, 1995.

PELLING, M. *The Vulnerability of Cities: Natural Disasters and Social Resilience.* EARTHSCAN Publications Ltd, 2003.

PENNING-ROWSELL, E.; FLOYD, P.; RAMSBOTTOM, D.; SURENDRAN, S. Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Natural Hazards*, v. 36, n. 1–2, p. 43–64, 2005.

QI, H.; QI, P.; ALTINAKAR, M. S. GIS-Based Spatial Monte Carlo Analysis for Integrated Flood Management with Two Dimensional Flood Simulation. *Water Resources Management*, v. 27, n. 10, p. 3631–3645, 2013.

QUEVAUVILLER, P. Water sustainability and climate change in the EU and global context - Policy and research responses. *Issues in Environmental Science and Technology*, p. 1–24, 2011.

RADMEHR, A.; ARAGHINEJAD, S. Developing strategies for urban flood management of tehran city using SMCDM and ANN. *Journal of Computing in Civil Engineering*, v. 28, n. 6,

p. 1–8, 2014.

RADMEHR, A.; ARAGHINEJAD, S. Flood Vulnerability Analysis by Fuzzy Spatial Multi Criteria Decision Making. *Water Resources Management*, v. 29, n. 12, p. 4427–4445, 2015.

RAHMATI, O.; ZEINIVAND, H.; BESHARAT, M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 7, n. 3, p. 1000–1017, 2016.

RINCÓN, D.; KHAN, U. T.; ARMENAKIS, C. Flood risk mapping using GIS and multi-criteria analysis: A greater toronto area case study. *Geosciences (Switzerland)*, v. 8, n. 8, 2018.

ROGERS, M.; BRUEN, M. A new system for weighting environmental criteria for use within ELECTRE III. *European Journal of Operational Research*, v. 107, n. 3, p. 552–563, 1998.

ROY, B. Multicriteria methodology for decision aiding. *Kluwer Academic Publishers*, 1996.

SALINAS, J. L.; CASTELLARIN, A.; KOHNAVÁ, S.Ç KJELDSEN, T. R. Regional parent flood frequency distributions in Europe - Part 2: Climate and scale controls. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 18, n. 11, p. 4391–4401, 2014.

SAMUELS, P.; KLIJN, F.; DIJKMAN, J. An analysis of the current practice of policies on river flood risk management in different countries. *Irrigation and Drainage*, v. 55, n. SUPPL. 1, p. 25–27, 2006.

SAYERS, P.; GALOWAY, G.; PENNING-ROWSELL, E.; YUANYUAN, L.; FUXIN, S.; YIWEI, C.; KANG, W.; LE QUESNE, T.; WANG, L.; GUAN, Y. Strategic flood management: ten ‘golden rules’ to guide a sound approach. *International Journal of River Basin Management*, v. 13, n. 2, p. 137–151, 2015.

SCHEUER, S.; HAASE, D.; MEYER, V. Exploring multicriteria flood vulnerability by integrating economic, social and ecological dimensions of flood risk and coping capacity: From a starting point view towards an end point view of vulnerability. *Natural Hazards*, v. 58, n. 2, p. 731–751, 2011.

SCHRÖTER, K.; KREIBICH, H.; VOGEL, K.; RIGGELSEN, C.; SCHERBAUM, F.; MERZ, B. How useful are complex flood damage models? -. *Water Resources Research*, v. 50, p. 3378–3395, 2014.

SINHA, R.; BAPALU, G. V.; SINGH, L. K.; RATH, B. Flood risk analysis in the Kosi river basin, north Bihar using multi-parametric approach of Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p. 335–349, 2008.

SOUISSI, D.; ZOUHRI, L.; HAMMAMI, S.; MSADDEK, M. H.; ZGHIBI, A.; DLALA, M. GIS-based MCDM–AHP modeling for flood susceptibility mapping of arid areas, southeastern Tunisia. *Geocarto International*, v. 0, n. 0, p. 000, 2019.

SOUZA, F. M. C. *Decisões racionais em situações de incerteza.* 2. ampl. ed. Recife: Livro Rápido, 2005.

SPANCOLD. Risk Analysis as applied to dam safety, Technical Guide on Operation of Dams and Reservoirs, Technical Guides on Dam safety, n.8, v. 1, Spanish National Committee on Large Dams, Madrid, 91–93, 2012.

STEDINGER, J. R. Quantile Estimators for Hydrologic Data. *Water Resources*, v. 36, n. 3, p. 737–744, 2000.

STEFANIDIS, S.; STATHIS, D. Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, v. 68, n. 2, p. 569–585, 2013.

TANG, Z.; ZHANG, H.; YI, S.; XIAO, Y. Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis. *Journal of Hydrolo***gy**, v. 558, p. 144–158, 2018.

TURN Around Don't Drown. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019. Disponível em: https://www.weather.gov/tsa/hydro_tadd. Acesso em: 29 set. 2019.

VINCKE, P. *Multicritério decision-aid*. New York: John Wiley, 1992.

VINET, F., BIGOT, V.; PETRUCCI, O.; PAPAGIANNAKI, K.; LIASAT, M.C.; KOTRONI, V.; BOISSIER, L.; ACETO, L.; GRIMALT, M.; LIASAT-BOTIJA, M.; PASQUA, A.A.; ROSSELLO, J.; KILIÇ, O.; KAHRAMAN, M.; TRAMBLAY, Y. Mapping flood-related mortality in the mediterranean basin. Results from the MEFF v2.0 DB. *Water (Switzerland*), v. 11, n. 10, 2019.

WALL, D. M. Distributions and correlations in Monte Carlo simulation. *Construction Management and Economics*, v. 15, n. 3, p. 241-258, 1997.

WALLEMACQ, P.; ROWENA, H. Economic losses, poverty & disasters: 1998-2017. *United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR)*, p. 31, 2018.

WANG, Y.; LI, Z.; TANG, Z.; ZENG, G. A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, v. 25, n. 13, p. 3465–3484, 2011.

WILLEMS, P.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; OLSSON, J.; NGUYEN, V. T. V. Climate change impact assessment on urban rainfall extremes and urban drainage: Methods and shortcomings. *Atmospheric Research*, v. 103, p. 106–118, 2012.

ZAGONARI, F.; ROSSI, C. A heterogeneous multi-criteria multi-expert decision-support system for scoring combinations of flood mitigation and recovery options. *Environmental Modelling and Software*, v. 49, p. 152–165, 2013.

ZHANG, W.; ZHOU, J.; LIU, Y.; CHEN, X.; WANG, C. Emergency evacuation planning against dike-break flood: a GIS-based DSS for flood detention basin of Jingjiang in central China. *Natural Hazards*, v. 81, n. 2, p. 1283–1301, 2016.

ZHU, F.; ZHONG, P. AN; SUN, Y. Multi-criteria group decision making under uncertainty: Application in reservoir flood control operation. *Environmental Modelling and Software*, v. 100, p. 236–251, 2018.

ZHU, F.; ZHONG, P.; WU, Y.; SUN, Y.; CHEN, J.; JIA, B. SMAA-based stochastic multi-criteria decision making for reservoir flood control operation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 31, n. 6, p. 1485–1497, 2017.

ZOLFANI, S. H.; POURHOSSEIN, M.; YAZDANI, M.; ZAVADSKAS, E. K. Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework. *Alexandria Engineering Journal*, v. 57, p. 357–365, 2018.

ZOU, Q.; ZHOU, J.; ZHOU, C.; SONG, L.; GUO, J. Comprehensive flood risk assessment based on set pair analysis-variable fuzzy sets model and fuzzy AHP. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 27, n. 2, p. 525–546, 2013.