



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

NICOLAS LENNICK BOMFIM DE ALBUQUERQUE

GERENCIAMENTO DE RISCOS EM DESASTRES NATURAIS: modelos de decisão multicritério e baseado em agente para gestão emergencial de inundações

Caruaru

2021

NICOLAS LENNICK BOMFIM DE ALBUQUERQUE

GERENCIAMENTO DE RISCOS EM DESASTRES NATURAIS: modelos de decisão multicritério e baseado em agente para gestão emergencial de inundações

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar

Caruaru
2021

NICOLAS LENNICK BOMFIM DE ALBUQUERQUE

GERENCIAMENTO DE RISCOS EM DESASTRES NATURAIS: modelos de decisão multicritério e baseado em agente para gestão emergencial de inundações

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção

Aprovada em: 10/11/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcelo Hazin Alencar (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a. Mischel Carmen Neyra Belderrain (Examinadora Externa)
Instituto Tecnológico de Aeronáutica

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que tem me sustentado debaixo de sua graça e misericórdia.

Aos meus pais, Soraya Bomfim e Mário André, que, incondicionalmente, lutaram, me apoiam, me incentivam durante toda minha trajetória acadêmica; meus irmãos, Wesley Bomfim e Natália Bomfim, meus melhores amigos e confidentes; minha avó, Irene Maria, por todo amor, todo carinho e pelas orações; e minha tia Meire, minha mãe do coração. Sou grato pela vida de vocês!

Ao meu orientador, Prof. Marcelo Hazin Alencar, pelos direcionamentos ao logo do trabalho, ensinamentos e conhecimentos compartilhados. Pessoa a quem sempre serei grato e tenho imensa admiração e respeito.

Aos meus colegas de REASON, Lucas Borges e Igor Andrade, que não mediram esforços em me ajudar ao longo do desenvolvimento do trabalho. Sou muito grato a vocês!

Costumo dizer que a vida não me deu amigos, mas, sim, anjos protetores. Sou grato, em especial, a Bruno Ribeiro, por acreditar em mim mais do que eu mesmo, pela paciência, pelos momentos de descontração e por todo apoio; Samy Dantas, por sempre me conceder os melhores conselhos com todo bom humor e sabedoria; Silvio Nunes Jr, por ter sido, além de amigo e confidente, também meu revisor de texto e inspiração pela sua brilhante trajetória acadêmica; e Karline Cordeiro, que sempre soube exatamente o que dizer para confortar meu acelerado coração.

Ao meu amigo de mestrado, Duan Vilela, por quem tenho grande admiração e inspiração, pelos momentos de conhecimento e pela de amizade construída.

Aos meus eternos professores e mestres da graduação e da vida, à Profa. Ana Lucena e ao Prof. Diógenes Meneses, pelos conselhos, ensinamentos e todo o carinho.

Sou, também, profundamente grato a todos que compõem o Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da UFPE/CAA (professores, examinadores da defesa da dissertação, alunos e funcionários) pelas contribuições durante a minha formação.

“Não vos aconselho o trabalho, mas a luta. Não vos aconselho a paz, mas a vitória. Seja o vosso trabalho uma luta! Seja vossa paz uma vitória! [...]”. (NIETZSCHE, 1884, p. 85).

RESUMO

As recorrentes ocorrências de desastres naturais nos últimos anos têm feito a gestão emergencial de desastres ser um dos principais desafios para a sociedade, vista a necessidade de planejamento das ações durante situações de emergência. Sob essa perspectiva, foi realizada de uma revisão sistemática da literatura para identificar o estado da arte e as tendências dos trabalhos dentro do escopo desta pesquisa, para, então, propor um modelo de decisão multicritério baseado na Teoria da Decisão e Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) em apoio às ações de emergência em resposta à ocorrência de inundação em áreas urbanas. O modelo proposto por esse trabalho considera quatro dimensões de consequência: econômica, viabilidade de rota, capacidade e número de evacuados, possibilitando que o decisor obtenha um ranking das principais potenciais localizações para estruturação de abrigos emergenciais temporários e planejamento das ações de assistência nas áreas afetadas. Além disso, este trabalho buscou explorar como as técnicas de simulação, computacional, em especial os Modelos Baseados em Agente (MBA), os quais podem ter um papel importante na compreensão das complexidades inerentes no gerenciamento de emergências e no planejamento urbano. Dessa forma, o MBA que simula o comportamento das pessoas durante uma evacuação e operações humanitárias foi desenvolvido no ambiente AnyLogic®. Com isso, o modelo MCDM associado ao MBA busca contribuir com a sociedade no que concerne à estruturação da tomada de decisão de cenários emergenciais ao munir o decisor de uma abordagem quantitativa, multidimensional e computacional que leva em consideração as incertezas e as complexidades associadas ao problema. Portanto, a utilização do modelo proposto torna a tomada de decisão para seleção de abrigos e alocação de recursos mais eficiente, uma vez que permite que estes sejam geridos e alocados primeiramente àquelas alternativas com maior potencial de salvar e proteger vidas. Além disso, o modelo possui flexibilidade, podendo ser replicado em qualquer região do mundo afetada por desastres de inundações e, também, apresenta uma proposta alternativa com potencial de melhorias de gestão emergencial, possibilitando ao tomador de decisão ter acesso a informações e, com isso, uma melhor elaboração de respostas às crises.

Palavras-chave: decisão multicritério; MAUT; desastres naturais; inundação; gerenciamento emergencial; gerenciamento de riscos; simulação baseada em agente.

ABSTRACT

The recurrent occurrences of natural disasters in recent years have made emergency disaster management one of the main challenges for society, given the need for action planning during emergency situations. Under this perspective, a systematic literature review was conducted to identify the state of the art and trends of the works within the scope of this research, to then propose a multi-criteria decision model based on Decision Theory and Multi-attribute Utility Theory (MAUT) in support of emergency actions in response to the occurrence of flooding in urban areas. The model proposed by this work considers three dimensions of consequence: economic, route feasibility, capacity and number of evacuees, allowing the decision maker to obtain a ranking of the main potential locations for structuring temporary emergency shelters and planning of assistance actions in the affected areas. Moreover, this work sought to explore how simulation techniques, computational, in particular Agent Based Models (MBA), which can play an important role in understanding the complexities inherent in emergency management and urban planning. Thus, the MBA that simulates the behavior of people during an evacuation and humanitarian operations was developed in the AnyLogic® environment. Thus, the MCDM model associated with the MBA seeks to contribute to society in terms of structuring the decision-making process of emergency scenarios by providing the decision maker with a quantitative, multidimensional and computational approach that takes into account the uncertainties and complexities associated with the problem. Therefore, using the proposed model makes the decision making for shelter selection and resource allocation more efficient, as it allows resources to be managed and allocated first to those alternatives with the greatest potential to save and protect lives. Moreover, the model has flexibility, and can be replicated in any region of the world affected by flood disasters, and also presents an alternative proposal with potential for improving emergency management, allowing the decision maker to have access to information and thus a better preparation of responses to crises.

Keywords: Multicriteria decision; MAUT; emergency management; natural disasters; agent-based simulation; flood risk management

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Justificativa	12
1.2	Objetivos do trabalho	13
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	13
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
1.3	Estrutura do trabalho	14
1.4	Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Fundamentação teórica	16
2.1.1	<i>Desastres naturais e gerenciamento de riscos</i>	17
2.1.2	<i>Apoio à decisão multicritério</i>	17
2.1.3	<i>Teoria da utilidade multiatributo</i>	23
2.1.4	<i>Teoria das filas</i>	27
2.1.5	<i>Simulação baseado em agente</i>	31
3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	37
3.1	Análise dos métodos utilizados para o gerenciamento de riscos de enchentes	38
3.2	Análise das abordagens da simulação baseada em agente para o gerenciamento de riscos de enchentes	41
3.3	Principais limitações das abordagens analisadas	44
4	MODELOS DESENVOLVIDOS PARA GERENCIAMENTO DE DESASTRES DE INUNDAÇÕES	46
4.1	Contextualização do problema	46
4.2	Desenvolvimento do modelo de decisão multicritério para seleção de abrigos emergenciais	49
4.2.1	<i>Caracterização dos decisores e objetivos</i>	51
4.2.2	<i>Levantamento das dimensões</i>	52
4.2.3	<i>Identificação dos cenários de perigo e fatores não controlados</i>	53
4.2.4	<i>Função utilidade e função probabilidade das consequências</i>	55
4.2.5	<i>Ranking das alternativas</i>	60
4.2.6	<i>Aplicação numérica e discussão preliminar dos resultados</i>	60
4.2.6.1	<i>Abrigos emergenciais temporários</i>	69
4.3	Modelagem baseada em agente de gestão emergencial de	

	desastres	77
4.3.1	<i>Modelo de evacuação</i>	80
4.3.2	<i>Modelo de logística humanitária</i>	86
4.3.3	<i>Simulação e resultados preliminares</i>	89
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
5.1	Conclusões	95
5.2	Limitações e trabalhos futuros	96
	REFERÊNCIAS	98

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas duas décadas, globalmente, a ocorrência de eventos naturais tem aumentado a frequência e a magnitude dos desastres naturais (CRED; UNISDR, 2015, 2021). Fatores associados à mudança climática, ao crescimento populacional e seu subsequente desenvolvimento mal planejado têm sido alguns dos principais agravantes, ao passo que a urbanização contribui para os benefícios da globalização. Estudos recentes apontam desafios a serem enfrentados na gestão urbana. Nas estimativas da Organização das Nações Unidas (ONU), o contingente populacional da Terra atingirá a marca de 11 bilhões de habitantes ao fim deste século, no qual aproximadamente 75% da população mundial viverá em áreas urbanas em 2050 (UNDRR, 2017; CRED, 2015).

As inundações são um dos riscos naturais que geram mais perdas financeiras ao redor do mundo, afetando milhões de pessoas a cada ano. Como indicado pelas estatísticas mundiais, os danos causados pelas inundações são continuamente crescentes (UNISDR, 2015; EM-DAT, 2021; SPRISLER, 2011). Essa tendência continuará, futuramente, devido aos aumentos previstos de precipitação em decorrência dos colapsos naturais causados pela mudança climática (IPCC, 2012; UNDRR, 2017).

A compreensão do risco e da magnitude das consequências dos desastres tem sido identificada como uma prioridade de ação para Redução de Riscos de Desastres (UNDRR, 2017). A avaliação quantitativa de risco de inundação é uma ferramenta valiosa para atender a essa chamada e pode ser um critério de decisão para priorizar estratégias de adaptação (AERTS, et al., 2018).

Embora métodos avançados para estimar e monitorar risco de inundação e exposição estejam progredindo rapidamente, a vulnerabilidade é frequentemente considerada constante (HAER, et al., 2016; AERTS, et al., 2018) e nem sempre consegue refletir a dinâmicas de interação entre seres humanos e os eventos de inundações (HAER et al., 2017; ABEBE, et al., 2019). Comunidades políticas, decisões governamentais e a iniciativa de indivíduos, bem como a implementação de medidas estruturais de mitigação (DUBBELBOER, et al., 2017), mudança de uso do solo e urbanização (CIULLO, et al., 2017), ou aquisição de seguros (Dubbelboer, et al., 2017; TONN E GUIKEMA, 2018), podem afetar a vulnerabilidade às inundações e a exposição ao longo do tempo, o que pode, desta feita, implicar a vulnerabilidade às inundações, mudar a frequência e a magnitude das inundações.

Assim, exige-se uma ampla agenda entre instituições técnico-científicas

públicas e privadas, as quais devem tomar decisões eficientes face à ocorrência de enchentes (DA SILVA, ALENCAR e DE ALMEIDA, 2020), como técnicas de gerenciamento de riscos de inundações (*Flood Risk Management – FRM*), planos de evacuação, sistemas de seguros, dentre outras medidas que precisam levar em consideração toda a complexidade e as várias dimensões que abrangem a ocorrência e os impactos das enchentes.

Diante disso, os métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM) podem fornecer vantagens, uma vez que possibilitam levar em consideração as visões de múltiplos stakeholders, com diferentes objetivos, considerando os tradeoffs, as alternativas viáveis e critérios de cada um deles. (DE BRITO; EVERS, 2016).

Adicionalmente, os modelos baseados em agentes (MBAs) oferecem uma plataforma flexível para desenvolver uma estrutura computacional para simular a coevolução das ações e interações de múltiplos agentes em um ambiente de catástrofe. Exemplos de aplicações incluem MBAs construídos para o planejamento da evacuação de inundações em áreas costeiras, considerando as pessoas, via veículos, através de uma rede de estradas e com foco especial na estimativa diferentes consequências sob diferentes cenários (YANG et al. 2018; LIU e LIM 2016; LUMBROSO & DAVISON 2018).

Portanto, a combinação de métodos multicritério e simulações computacionais pode ajudar os responsáveis pelas decisões a gerenciar os recursos e ações emergenciais, através de análises mais detalhadas do risco de inundação. Sob essa perspectiva, propõe-se um modelo de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo (MAUT) associado a modelos baseados em agente para suporte ao gerenciamento de ações emergenciais durante inundações, a partir da seleção da geolocalização de abrigos emergenciais e alocação de recursos durante os eventos como ferramenta suplementar para contribuir com o processo decisório de gestão de recursos e ações emergenciais.

A complexidade, associada ao planejamento da evacuação em um ambiente urbano, requer uma estrutura de modelagem computacional que possa incorporar todos os fatores mencionados no processo de modelagem, que se dá por meio de uma decomposição da complexidade desse sistema em subsistemas (agentes) que procuram entender os comportamentos de todo o sistema com base no comportamento de agentes individuais no cenário e as interações entre estes. A combinação das abordagens apresentadas contribui para o contexto de gestão emergencial de eventos de inundação na área urbana, observando-se alguns benefícios potenciais, tais como: estimar a localização de abrigos e o número de evacuados na área diante da infraestrutura de abrigos disponível; Contribuir para uma melhor compreensão da dinâmica do evento da inundação e como tais dinâmicas

afetariam o planejamento da gestão emergencial para desastres na evacuação dos grupos populacionais em áreas urbanas.

1.1 Justificativa

As inundações são perigos frequentes que podem perturbar as comunidades, em particular em áreas urbanas que envolvem importantes centros de pedestres, como centros de lazer e infraestruturas de transporte (BEKER et al. 2015).

As estruturas computacionais tornaram-se centrais para mitigar, preparar e gerenciar riscos de inundação (LUMBROSO et al. 2007; KREIBICH et al. 2010; KREIBICH et al. 2015). Há um reconhecimento crescente da necessidade estratégica de desenvolver, particularmente, uma estrutura para integrar a dinâmica do comportamento humano na análise de risco de inundação (AERTS et al. 2018; ZISCHG 2018; MCCLYMONT et al. 2019).

Para a análise de risco de inundação em escala urbana, poucos MBAs foram projetados para avaliação de estratégias de evacuação considerando o comportamento emergente de pessoas individuais em resposta a uma inundação. Da mesma forma, alguns modelos MCDM baseados na teoria da utilidade foram estruturados de modo a incorporar probabilisticamente as incertezas do cenário, seja por análise de mudanças climáticas e seus efeitos em bacias hidrográficas (BORSUK et al. 2021), por avaliações e priorização dos riscos das inundações em áreas urbanas (DA SILVA et al., 2020), avaliação da resiliência e recuperação de cidades afetadas por eventos hidrológicos (ZHU, H. et al) ou análise de evacuações (KAILIPONI, 2010).

Diante do exposto, entende-se que este estudo possui uma grande relevância à sociedade e para os setores público e privado, em virtude dos impactos que as inundações podem causar nas áreas urbanas, causando transtornos e deterioração da qualidade de vida da população, danos e perdas à infraestrutura urbana, além dos danos irreparáveis, como perdas de vidas humanas. A partir disso, vê-se a importância de preparar e planejar ações que forneçam conhecimento que possa ser posto em prática, a fim de auxiliar os formuladores de políticas públicas na escolha de ações preventivas, mitigadoras e reativas ao risco.

Ademais, o trabalho contribui para o estado da arte, considerando aspectos probabilísticos inerentes ao contexto da decisão, com abordagem e estrutura sólida da Teoria da utilidade multiatributo (MAUT) associada a simulação baseada em agente para melhor compreensão das interações e dinâmicas complexas do processo de gestão emergencial durante eventos extremos.

1.2 Objetivos do trabalho

Esta seção integra o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver modelos de decisão multicritério baseado na teoria da utilidade multiatributo (MAUT) e de simulação baseado em agente para auxiliar à gestão de estratégia emergenciais de enfrentamento aos riscos de desastres causados por inundações urbanas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar os principais conceitos associados ao estudo de gerenciamento de riscos, e desastres naturais;
- Observar como o gerenciamento de riscos é tratado dentro do contexto da ocorrência de desastres naturais;
- Realizar uma revisão sistemática da literatura com o intuito de apresentar os principais atributos, métodos utilizados para gerenciar os riscos de desastres naturais e principais abordagens de tratamento da gestão de riscos de inundações urbanas;
- Analisar trabalhos científicos para se observar o que está sendo desenvolvido acerca do tema proposto;
- Identificar lacunas e pontos fracos nos métodos de gerenciamento de riscos de inundações;
- Apresentar um diagnóstico acerca do gerenciamento de riscos associados a ocorrência de inundações;
- Estruturar um modelo de decisão multicritério para analisar as consequências das decisões do gestor diante de uma crise decorrente de um evento de inundação;
- Realizar uma aplicação numérica, em um cenário hipotético e, então, estruturar um modelo de simulação baseado em agente para melhor ilustração do evento de inundação e seus possíveis desdobramentos gerenciais.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está estruturado em 4 capítulos:

- No capítulo 1, Introdução, apresentou-se as motivações e justificativas para o desenvolvimento do trabalho, juntamente com os objetivos do estudo.
- O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica de decisão multicritério, teoria da utilidade multiatributo, teoria da decisão, teoria das filas, mudanças climáticas e desastres naturais, gerenciamento de riscos de inundações e simulação baseada em agente, bem como uma breve a revisão sistemática da literatura para identificar o uso de métodos multicritério associados a simulação baseada em agente no contexto de gerenciamento emergencial de riscos de inundações
- No capítulo 3 é apresentada uma breve revisão sistemática da literatura acerca dos temas relacionados a métodos multicritério, gestão de riscos de inundações e simulação baseada em agente.
- No capítulo 4 é proposto o modelo de geolocalização de abrigos emergências temporárias sob uma visão multidimensional do risco, considerando dimensões de consequência humana, econômica e operacional logística. Realiza-se uma aplicação numérica do modelo proposto com dados realísticos, gerando uma solução analítica que é incorporada a um modelo de simulação baseado em agente de evacuação e logística humanitária.
- Por último, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões, limitações, perspectivas para futuros trabalhos e impactos sociais do trabalho.

1.4 Síntese do estado da arte e posicionamento deste trabalho

A priori, deve-se destacar a importância da utilização de métodos apropriados para lidar com problemas reais e construir modelos que conduzam e o processo decisório a soluções exequíveis. Deve-se destacar a importância da utilização do MAUT no modelo desenvolvido neste trabalho, que se dá devido ao protocolo consistente de decisão, estabelecido pela sua estrutura axiomática e apoiado pela modelagem probabilística das incertezas inseridas em problemas de decisão multicritério sob cenários de incerteza (DE ALMEIDA, 2010, 2013)

Nas pesquisas realizadas para a elaboração desta dissertação, não se identificou nenhuma proposição da associação de um modelo que integre a adequada estruturação do MAUT com a visualização computacional das interações dos agentes inseridos nesse contexto de gestão emergencial. O modelo proposto neste trabalho traz a aplicação do MAUT para a análise quantitativa das consequências decorrentes da escolha de locais de

abrigos emergenciais temporários, utilizando a simulação baseada em agente para visualizar as ações de alocação de recursos emergenciais durante o cenário de crise causado por chuvas severas, que são eventos com baixas probabilidades de ocorrer mas com alta magnitude de impactos e consequências.

A aplicação do modelo permitirá ao decisor obter informações, de maneira a subsidiar a construção de um plano de contingência de enfrentamento de desastres de inundações, de tal modo que permita a visualização do cenário, e das ações emergenciais (evacuação e assistência humanitária), com base na solução analítica proposta pelo método MCDM. Isso será possível diante dos desafios específicos enfrentados durante as operações de gestão emergencial, considerando variáveis críticas como incertezas de demanda dos recursos, tempo para evacuar os locais afetados e vulnerabilidade de infraestrutura.

A proposta inicial estará delimitada na construção de modelos separados (MAUT e MBA) no intuito de gerar informações úteis entre os modelos, bem como para a gestão emergencial de desastres para as organizações públicas de monitoramento e controle de desastres.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentação teórica

Nesta seção é apresentada a base conceitual para o trabalho, relacionada ao gerenciamento de riscos de inundações, à teoria da utilidade multiatributo (MAUT) e à Teoria das Filas e Modelagem baseada em agente (MBA).

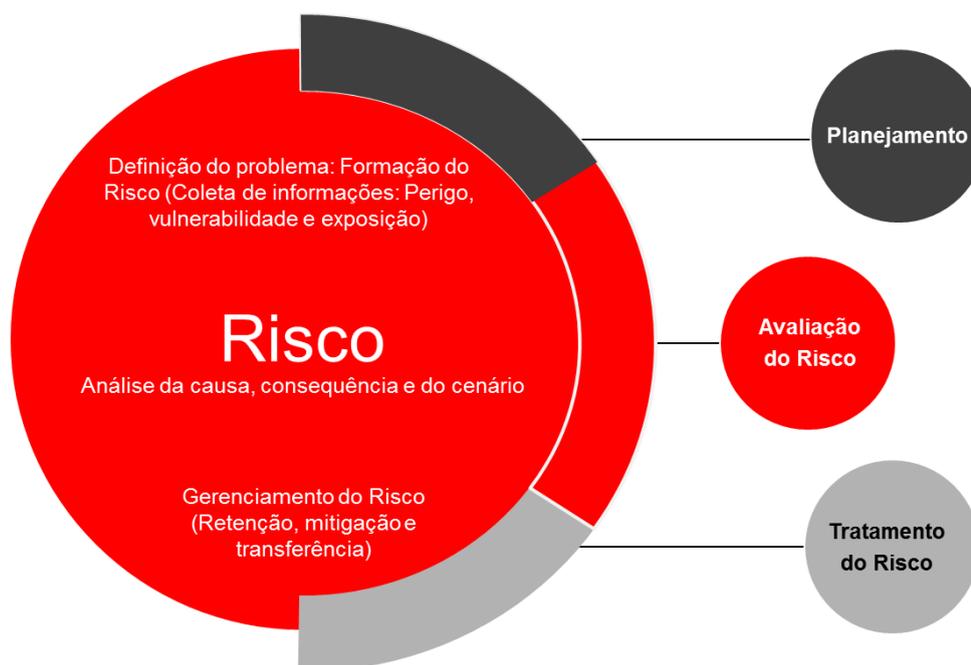
O risco está presente em diferentes contextos, desde o simples caminhar na rua até atividades mais complexas. Apesar de a sociedade lidar com o risco diariamente, ainda há várias definições do termo risco na literatura. O conceito básico está associado com a incerteza em um ambiente e isso está relacionado com a probabilidade da ocorrência de um evento indesejável e do impacto de suas consequências (DE ALMEIDA et al., 2015). O gerenciamento do risco possui uma abordagem estruturada e prática da gestão da incerteza, de modo a minimizar potenciais danos e perdas que abrangem a avaliação, a análise do risco e a implementação de estratégias e ações específicas para controlar, reduzir e transferir riscos (CRED e UNISDR, 2015). Para de Almeida et al. (2015), isto é fundamental para que as mais adequadas ações de mitigação possam ser adequadamente planejadas e implementadas. Por sua vez, essas consequências são sempre baseadas em uma referência de estado ou nível atual, isto é, um estado normal, um nível planejado ou uma meta.

De acordo com De Almeida et al. (2015), o risco deve ser entendido em função do perigo, vulnerabilidade, exposição e resiliência. O gerenciamento de risco permite entender essa dinâmica e direcionar os setores públicos e privados a tomarem decisões baseadas em modelos desenvolvidos para analisar riscos incertos com distribuições probabilísticas para ameaças, vulnerabilidade e consequências (ALENCAR; NASCIMENTO, 2016). Assim, é possível haver um melhor processo de desenvolvimento e aplicação de políticas e protocolos, em termos de avaliação, monitoramento, comunicação, prevenção e mitigação dos riscos.

O processo de gerenciamento de riscos é apontado por autores como Aven (2015) e a Chen et al (2019) em 3 fases. Conforme a figura 1, a primeira fase, de planejamento, vai desde a formação do risco, em que inclui detalhamento dos dados sobre o perigo, os danos e as consequências em detrimento da vulnerabilidade e exposição. A segunda fase é pautada pela análise do nível do risco, de acordo com as várias fontes do risco e do alcance dos efeitos através de uma metodologia de avaliação do risco de desastres selecionada pelo gerente de risco. Dessa maneira, na terceira fase, haverá a possibilidade de o tomador de decisão desenhar as estratégias de gerenciamento do risco necessárias, que podem ser traduzidas em medidas de enfrentamentos, planos de emergência e

contingência, ações de assistência e reestruturação.

Figura 1 - Formação e gerenciamento do risco



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de AVEN (2015) e CHEN *et al.* (2019)

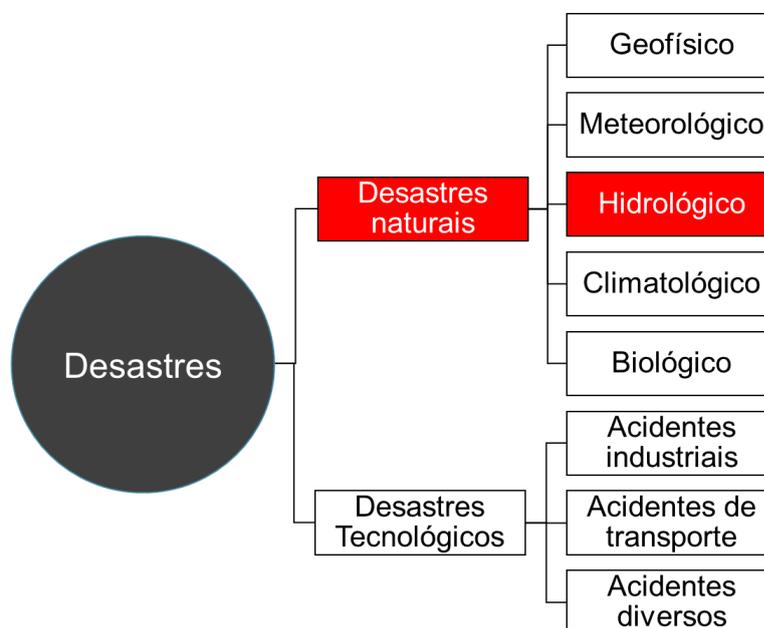
O gerenciamento de riscos se baseia nas avaliações dos riscos e nas lições aprendidas, que podem ser estruturadas em planos de emergência e contingência, políticas e práticas eficazes e eficientes (WISNER; GAILLARD; KELMAN, 2011). Os autores de Almeida *et al.* (2015) expõem que as organizações e os países deveriam considerar a busca por gerenciamentos do risco mais efetivos. Ainda segundo mesmos autores, os princípios e procedimentos do gerenciamento de risco podem ser aplicados em um contexto de risco de desastres naturais. Contudo, ressaltam-se alguns obstáculos, como problemas relacionados a disponibilidade de uma base de dados confiável, pois a dinâmica populacional da sociedade associadas as mudanças climáticas podem tornam os dados coletados em períodos anteriores inapropriados para os estudos nesse contexto.

2.1.1 Desastres naturais e gerenciamento de riscos

O EM-DAT (2021) afirma que os desastres podem ser agrupados em desastres naturais e tecnológicos e se subdividem em Desastres Tecnológicos e Naturais (figura 2). O primeiro grupo se subdivide em Acidentes industriais, Acidentes de transporte e Acidentes diversos; já o segundo grupo compreende desastres Geofísico, Meteorológico,

Climatológico, Biológico, Extraterrestre e, por fim, os que são objeto de análise do presente estudo, os Hidrológicos, que são compostos por: inundações, enxurradas, alagamentos e inundações (BRASIL, 2009).

Figura 2 - Agrupamento dos tipos de desastres



Fonte: O Autor (2021)

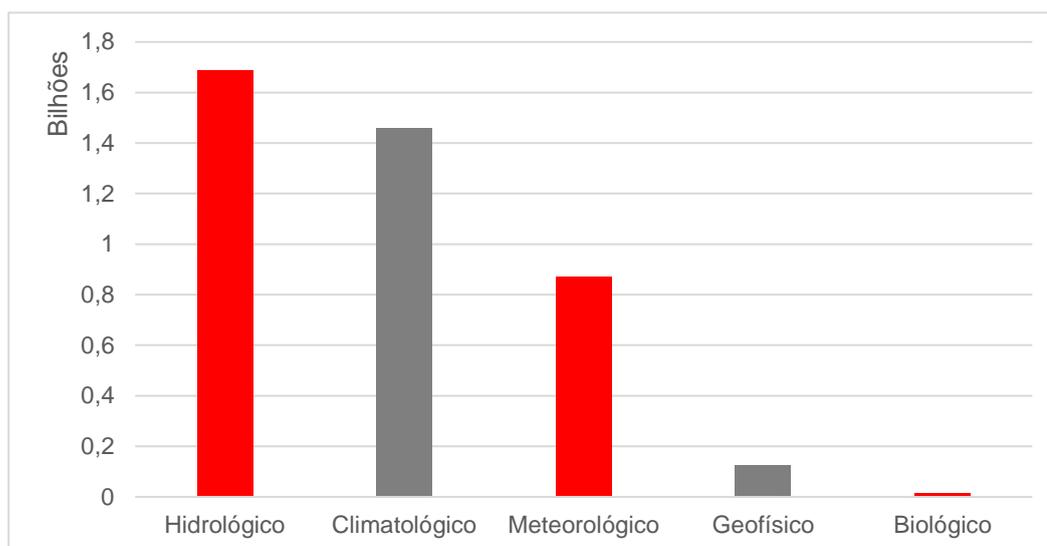
Nota: Adaptado de EM-DAT (2021)

Os desastres naturais têm sido um dos maiores problemas que a humanidade vem enfrentando no mundo inteiro. Além de causar perdas econômicas significativas ao longo das últimas décadas, sua incidência vem crescendo e, assim, impondo sérios desafios para o desenvolvimento sustentável, considerando as dimensões sociais, econômicas e ambientais (ZHOU et al., 2014). Os desastres naturais podem ser definidos como a consequência da vulnerabilidade humana atrelada ao risco natural, considerando, também, a vulnerabilidade natural (AYALA, 2002). Logo, pode-se ter como consequências tanto as perdas como os danos materiais e/ou econômicos, interligando-se, ainda, aos impactos ambientais e saúde da população (XAVIER et al, 2014).

Embora esses desastres tenham origens naturais, geralmente são provocadas e/ou intensificadas por ações antrópicas, como, por exemplo, o crescimento populacional das áreas urbanas não planejadas e os riscos associados aos efeitos da mudança climática, os quais, ao serem combinados, aumentam a probabilidade da materialização de desastres naturais, com potenciais danos severos (DA SILVA; ALENCAR; DE ALMEIDA, 2020). Segundo o EM-DAT (2021), essa combinação nos últimos 20 anos tem afetado cerca 4 bilhões de pessoas ao redor do mundo, sendo de 1,7 bilhões o número de pessoas afetadas por desastres naturais hidrológicos (como inundações, tsunamis, maremotos), seguidos por outros desastres que, da mesma forma, têm como agravante a mudança climática e

incertezas meteorológicas (ver Gráfico 1)

Gráfico 1 – Total Global de afetados por desastres naturais entre 2000-2020



Fonte: O Autor (2021)

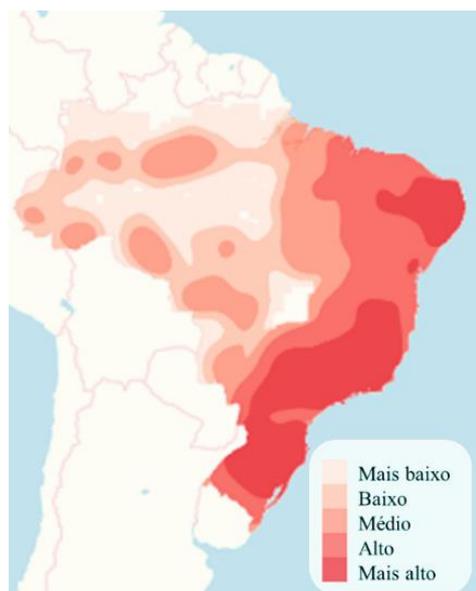
Nota: Adaptado de EM-DAT (2021)

Os desastres naturais podem desencadear consequências multidimensionais (humanos, materiais, econômicos e ambientais) que necessitam de respostas de emergência (de caráter imediato), as quais podem ser entendidas como reações geradas por uma ocorrência perigosa ou um acidente em que haja necessidade imediata de intervenção interna e externa no local. Essas intervenções são realizadas para conter e controlar as consequências, preservar a integridade das pessoas, minimizar os danos à propriedade e ao meio ambiente e minimizar a interrupção das atividades dos setores socioeconômicas (DA SILVA et al., 2020; SPRISLER; 2011; CRED, 2021).

Por isso, a ocorrência dos desastres naturais tem se tornado uma questão cada vez mais importante para governos, organizações internacionais, pesquisadores e agências de gestão de emergência que buscam maneiras mais eficientes de responder às possíveis consequências decorrentes de tais eventos (NASCIMENTO; ALENCAR, 2016), preocupação essa que se dá diante das severas consequências desses eventos nas atividades econômicas da região afetada.

É possível identificar no mapa de densidade de desastres (mapa 1), que produz uma visualização processada e suavizada da concentração de ocorrências desses eventos, que a maior ocorrência de desastres está concentrada em áreas urbanas e costeiras, nas quais estão concentradas as atividades econômicas, maiores índices de urbanização e crescimento demográfico, de modo a tornar essas regiões mais suscetíveis (probabilidade de ocorrência) e vulneráveis à ocorrência de desastres naturais por inundações.

Mapa 1 – Mapa de densidade de desastres



Fonte: O Autor (2021)

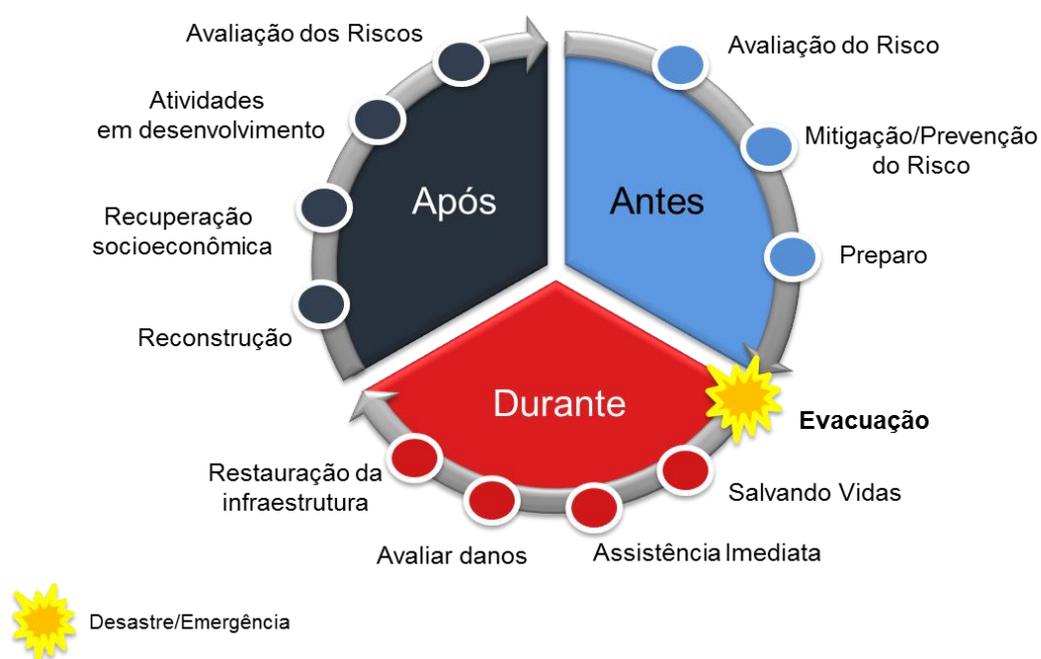
Nota: Adaptado de EM-DAT (2021)

O gerenciamento de Riscos de Desastres (GRD) consiste em um processo social cujo objetivo é prever a redução e o controle permanente dos fatores de risco de desastre na sociedade, integrado ao desenvolvimento humano, econômico ambiental e territorial sustentável (LAVELL; NARVÁEZ; ORTEGA, 2009). Wisner, Gaillard e Kelman (2011) afirmam que a gestão de riscos de desastres é desenvolvida a partir de um enfoque de assistência e resposta. O gerenciamento do risco aborda com maior foco a redução de vulnerabilidades e o aumento das capacidades de enfrentamento, iniciativas que visam a mitigação e prevenção.

De acordo com a *United Nations Office for Disaster Risk Reduction - UNDRR* (UNDRR, 2017), a gestão de risco de desastres (GRD) consiste no processo de implementação de políticas e estratégias de redução do risco de desastre para prevenir e mitigar riscos potenciais, mediante o fortalecimento da resiliência e a redução de perdas de desastres. Trata-se, então, de uma abordagem prévia ao desastre, que envolve a cooperação técnico-científica de organizações públicas e privadas, ONGs, universidades e da sociedade civil (SHAW, 2021).

Então, a partir da materialização do desastre, sinergicamente são despendidos esforços para resposta e pronto restabelecimento da infraestrutura e dos sistemas socioeconômicos afetados. Tais ações correspondem ao gerenciamento de riscos de desastre, que compreende o planejamento, a coordenação e a execução em resposta e de recuperação (Centro Universitário de Pesquisa e Estudos sobre Desastres (CEPED, 2014). Acerca do gerenciamento, têm-se como exemplo as medidas emergenciais de socorro e aquelas relacionadas ao retorno das atividades sociais e econômicas das comunidades, situadas no pós-desastres (conforme figura 3).

Figura 3 – Ciclo de Gerenciamento de Desastre



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de CEPED (2016)

Portanto, através de um plano de gerenciamento de riscos de desastres é possível executar um acionamento coordenado da comunicação entre instituições, comunidades, autoridades e empresas envolvidas. A amplificação de incidentes e acidentes em desastres sempre é possível quando não se tem claro os conceitos, os fatores, os atores que interferem na emergência e o treinamento adequado para dar resposta adequada, em tempo e proporção, às emergências.

2.1.2 Apoio à decisão multicritério

Sabe-se que um modelo pode ser entendido como a representação simplificada da realidade, cuja essência do problema investigado pode ser abstraída, de modo a facilitar a análise do problema em questão. Um problema de decisão multicritério se caracteriza mediante a situações em que o decisor possui mais de uma alternativa de escolhas associadas a variáveis de decisão, chamadas de critérios ou atributos, normalmente conflitantes entre si.

O modelo MCDM/A incorpora a estrutura de preferência do decisor e questões particulares para um problema específico de decisão.

Alencar (2010) pontua que, globalmente, as tomadas de decisão vêm se tornando cada vez mais objeto de estudo, devido a grande importância associada a sua natureza e suas consequências. A construção de um modelo de tomada de decisão é um processo complexo e depende da natureza do problema e pode ser definida como (Roy, 1996):

1. **Problemática de escolha ($P\alpha$):** usado para selecionar a melhor opção de um conjunto de alternativas/ações;
2. **Problemática de classificação ($P\beta$):** usado para alocar um conjunto de alternativas a categorias pré-determinadas;
3. **Problemática de Ordenação ($P\gamma$):** usado para ordenar as alternativas parcialmente ou completamente;
4. **Problemática de descrição ($P\delta$):** usado para apoiar as decisões pela descrição das alternativas/ações e suas consequências.

Além do mais, De Almeida (2013) ainda apresenta a problemática de portfólio, utilizada para escolher, a partir do conjunto de alternativas, um subconjunto que atenda aos objetivos, como elevar e obter as melhores consequências, mesmo sob algum tipo de restrição, como a de orçamento, o que faz com que a definição e a estruturação do problema sejam importantes passos no procedimento de implementação da metodologia MCDM/M.

Há muitas discussões acadêmicas sobre a aplicação das técnicas MCDM em diferentes campos e áreas de conhecimento. Aven (2012), por exemplo, afirma que no contexto de problemas e inundações, as avaliações qualitativas e quantitativas dos fatores que compõem o cenário de desastre de inundação estão sujeitas a incertezas, isto é, múltiplos critérios, de diferentes naturezas, precisam ser satisfatórios para encontrar as alternativas mais adequadas entre várias opções viáveis, que resultem nas melhores consequências.

Alencar (2010) afirma que a análise de decisão multicritério (MCDM/M) pode apoiar todo o processo de tomada de decisão de emergência, pois aceita, na sua estrutura

axiomática, a subjetividade nos processos decisórios. López e De Almeida (2014) comentam que os métodos buscam estabelecer relações de preferências (subjetivas) perante várias alternativas avaliadas sob a influência de múltiplos critérios durante o processo decisório.

De Almeida et al. (2017) identificaram tendências das pesquisas em lidar com modelos multidimensionais, levando em consideração as estruturas de preferência de um decisor. Os métodos multicritérios são utilizados em diversos contextos de gerenciamento de riscos multidimensionais, através de protocolos consistentes e adequados para incorporar a incerteza dos problemas de decisão do mundo real. Seja em contextos de acidentes de trânsito, como em Martins e Garcez (2021), que propõem um modelo de tratamento dos riscos de acidentes nas estradas; seleção de sistemas ótimos de bombeamento de água subterrânea (RUBIO-ALIAGA et al, 2021); contexto de empresas de seleção de fornecedores (GARCEZ; CAVALCANTI; DE ALMEIDA, 2021). No que concerne aos contextos de risco e incerteza hidrológica, é possível destacar trabalhos como os de Da Silva et al. (2018); Pham et al. (2021) e Zhu et al (2017).

Aven (2015), ao discutir abordagens e métodos para enfrentar essas incertezas profundas, elenca uma série de métodos robustos, com abordagens probabilísticas e adaptativas, que permitem melhorar a previsão e a decisão em tais contextos, e destaca abordagens baseadas na Teoria da Utilidade Esperada e a abordagem Bayesiana.

Nesse contexto, um método multicritério com os aspectos citados, destaca-se a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), que é abordado na próxima seção.

2.1.3 Teoria da utilidade multiatributo

A teoria da utilidade expressa, quantitativamente, o índice de desejabilidade, isto é, a satisfação do decisor pelas suas escolhas relativas diante de um conjunto de elementos (CAMPELO DE SOUZA, 2005).

O MAUT é uma derivação da Teoria da Utilidade e da Teoria da decisão, que utiliza os conceitos de modelagem de preferência do decisor em relação às consequências, que são modeladas de modo a fornecer uma função de síntese que tem como objetivo agregar todos os critérios em uma única função analítica em que se pode agregar o comportamento do decisor, os valores de preferência e os parâmetros, como critérios, chamados de atributos e alternativas do problema de decisão convertidos em pesos, chamados de constantes de escalas (KEENEY; RAIFFA, 1976; GOMES et al., 2004; DE ALMEIDA, 2013).

A construção de modelos baseado em MAUT inclui os fatores básicos tratados pela teoria da decisão, tais como: os estado da natureza (θ), as ações (alternativas) que o

decisor pode adotar (α), consequências (P), que podem ser estimadas através das funções probabilidade da consequência. Ela também trata de incertezas inerentes aos problemas a serem analisados (DE ALMEIDA, 2011, 2013).

Diante dos cenários de incertezas, de Almeida (2011; 2013; 2015) ressalta o cuidado que se deve ter ao distinguir a “função valor” da “função utilidade”. Já que a primeira se associa a avaliação de consequências em contextos de certeza, a função utilidade está associada a avaliação de consequências através de uma modelagem probabilística, na qual o tratamento das incertezas está inserido dentro da estrutura axiomática do MAUT, que permite, assim, uma abordagem mais consistente para problemas de decisão sob incerteza.

Keeney & Raiffa (1976) resumem o MAUT em cinco principais etapas:

1. Introdução da terminologia e da ideia;
2. Identificação das hipóteses relevantes de independência;
3. Avaliação das funções de utilidade condicional;
4. Avaliação das constantes de escala;
5. Verificação de consistência.

A primeira etapa traz a compreensão do propósito da função utilidade (u), ou seja, uma função f , de maneira que $u(x_1, x_2, \dots, x_n) = f[u_1(x_1), u_2(x_2), \dots, u_n(x_n)]$, em que u_i corresponde a uma função utilidade sobre o atributo x_i , que define o espaço de consequência, de modo que se esclareça ao decisor que não existe uma preferência ótima a ser definida, mas, sim, um conjunto de consequências em que o decisor demonstra suas preferências (GOMES et al., 2006; DE ALMEIDA, 2013).

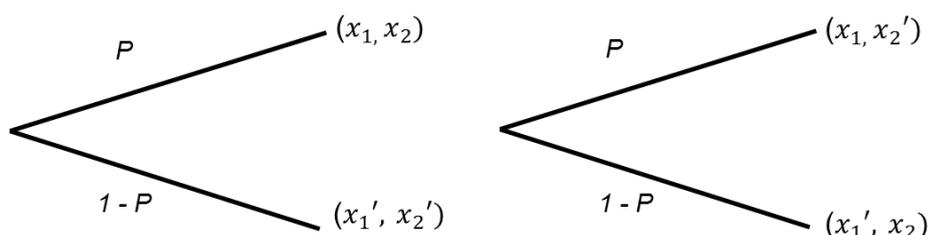
Nesse protocolo, o segundo passo propõe a identificação dos pressupostos de independência em preferência do decisor com relação aos atributos x_i . Segundo Keeney e Raiffa (1976), considerando um espaço consequência com dois atributos x_1 e x_2 , um atributo x_1 é independente em utilidade de um atributo x_2 quando as preferências condicionais por loteria em x_1 diante de um nível de x_2 fixado não dependem do nível particular de x_2 . Este pressuposto simplifica os cálculos para obtenção da função utilidade multiatributo (DE ALMEIDA, 2013)

Outro aspecto relevante, ainda de acordo com Keeney e Raiffa (1976), está relacionado às características de independência em preferência. Um atributo x_i é independente em utilidade dos demais atributos se as preferências sobre as loterias $[(x_1, x_2), p; (x'_1, x'_2), p - 1]$ em diferentes níveis de x_i não dependam de um nível fixo nos atributos restantes. Isto é, se dois atributos (x_1, x_2) que são aditivamente independentes de duas loterias forem igualmente preferíveis a todo (x_1, x_2) e para um x'_1 e x'_2 arbitrariamente escolhidos (figura 2.5) em que cada uma das loterias, por exemplo, tenham

50% de chance de se obter x_1 ou x_1' independente do valor de x_2 .

Antes de se envolver o terceiro passo, referente à eliciação da função utilidade, é essencial familiarizar o decisor com conceitos como: análise de decisão e loterias. De acordo com Keeney e Raiffa (1976), o conceito de utilidade esperada, apresentado por Von Neumann-Morgenstern, permite valorar a distribuição de probabilidade dos possíveis resultados de uma decisão, estabelecendo a preferência entre as decisões e caracterizar uma atitude de risco individual através de simples loterias (figura 4).

Figura 4 – Loteria para verificação da independência aditiva

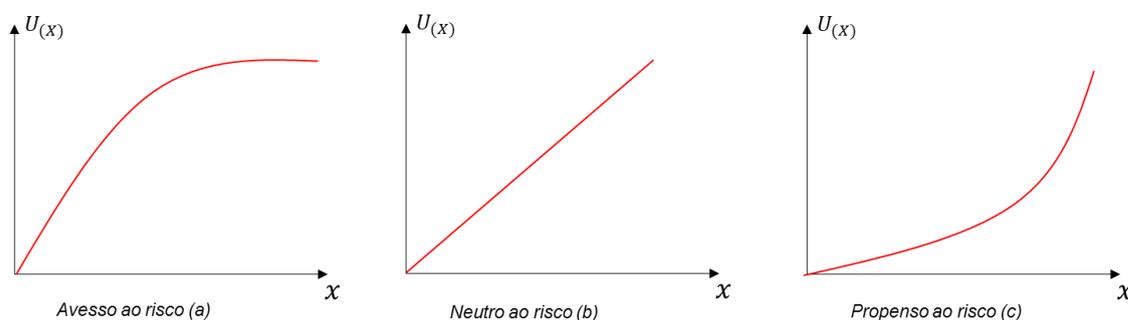


Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976)

Dessa forma, a imagem da função utilidade do indivíduo pode assumir um comportamento côncavo (figura 2.6-a), linear (figura 2.6-b) ou convexo (figura 2.6-c), o que significa, então, um decisor avesso ao risco, neutro ao risco ou propenso ao risco, respectivamente (ver gráfico 2).

Gráfico 2 – Tipos de função utilidade



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976)

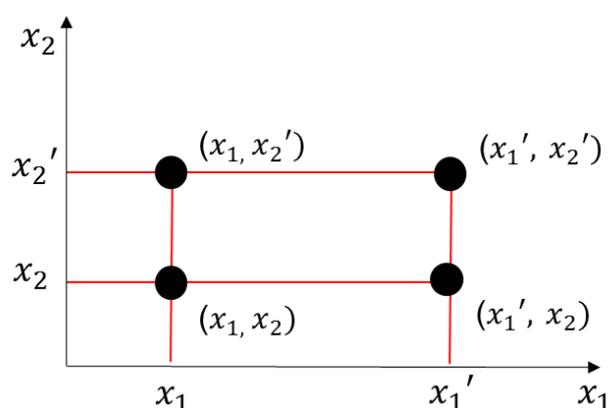
O quarto passo corresponde a avaliação da constante de escala. De Almeida (2011, 2013) alerta a respeito do equívoco em determinar os valores das constantes de escala como peso (grau de importância dos atributos). Apesar das constantes de escala indicarem a importância entre atributos, é preciso compreender que elas estão associadas a taxa de

substituição, que traduz a ideia de compensação de ganho de um critério, quando se perde em outro. Consequentemente, elas dependem diretamente da faixa de valores considerados no espaço de consequência.

É possível estimar as constantes de escala através dos procedimentos de *trade-off* dos valores de consequências definidos em Keeney & Raiffa (1976).

O quinto passo consiste na implementação do modelo através da função multiatributo $u(x_1, x_2, \dots, x_n)$, a qual pode ter a forma aditiva, quando a condição de marginalidade de preferência é verificada, em que as preferências do decisor por qualquer loterias $p, q \in P$ devam depender apenas das probabilidades marginais dos valores dos atributos e não de suas distribuições de probabilidades conjuntas. Assim, o decisor deve ser indiferente entre duas loterias (gráfico 3) (KEENEY E RAIFFA, 1976; ROY, 1996; VINCKE, 1992).

Gráfico 3 – Espaço consequencia avaliado para análise de independencia aditiva



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Keeney & Raiffa (1976)

Dessa forma, pode-se expressar a utilidade multiatributo na forma aditiva somente se os atributos x_1, x_2, \dots, x_n possuírem independência mútua em utilidades, bem como a independência aditiva entre os atributos. Então:

$$u = \sum_{i=1}^n K_i U_i(x_i) \quad (2.1)$$

Em que u_i são funções utilidades unidimensionais $[0,1]$; e k_i são constantes de escala $[0,1]$ e $\sum_{i=1}^n K_i = 1$.

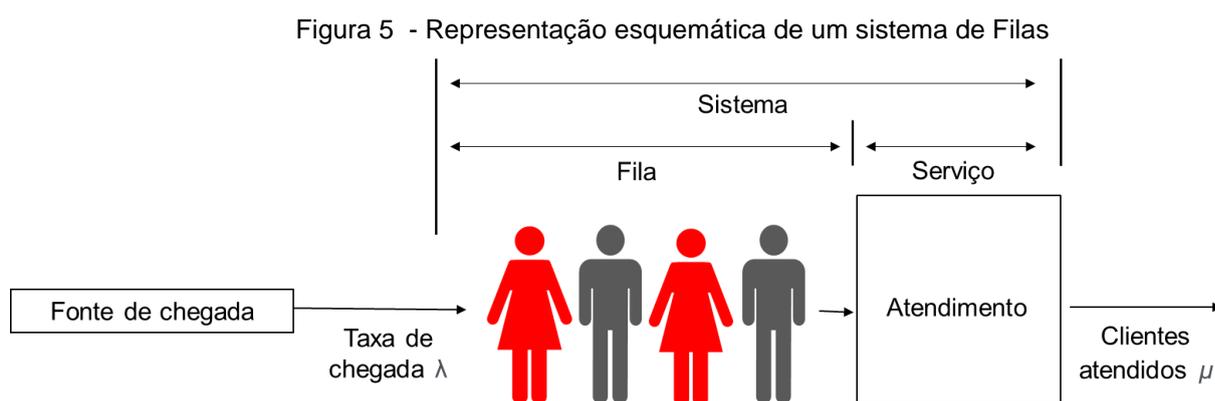
2.1.4 Teoria das filas

Neste item, são trazidos conceitos referentes à modelagem do número de pessoas que se encontram na zona de perigo e podem ser afetados por enchentes causadas por chuvas severas. Na seção 3 será apresentada de forma mais detalhada a relação de Teoria das Filas com o contexto analisado.

Apesar de não ser uma ferramenta de otimização, a Teoria das Filas é uma ferramenta na área da Pesquisa Operacional (PO) que permite determinar as medidas de desempenho de filas de espera, como o tempo médio de espera em filas e a produtividade da instalação de serviço, que então podem ser usadas para projetar a instalação do serviço (HILLIER e LIEBERMAN, 2013).

Os sistemas de filas, em que os clientes esperam na fila para serem atendidos por um servidor, estão presentes nas mais diversas atividades e processos presentes no dia-a-dia. Recentes trabalhos técnico-científicos abordam modelos de filas aplicados em diversas áreas, como atendimento de pacientes em um hospital (REMA e SIKDAR, 2021); itens em um sistema de fabricação (AFOLALU et al., 2021); sistemas de *call center* (KIYGI-CALLI; WEVERBERGH; FRANCES, 2021); passageiros em aeroportos internacionais (WU e MENGERSEN, 2013); e evacuações de emergência (VAN WOENSEL; VANDAELE 2007; NIU et al., 2021), os quais, claramente, são úteis para a compreensão de sistemas importantes do mundo real.

O Modelo de Filas tem como processo de fila básico a representação da Figura 5. De forma padrão, os clientes chegam por uma fonte de entrada, dada por uma taxa de chegada (λ) por unidade de tempo. Esses clientes entram no sistema de filas e se dirigem a uma fila para esperar o atendimento. Em um determinado momento, um cliente na fila é selecionado, seguindo alguma regra de atendimento, conhecida como disciplina da fila. O atendimento, então, é realizado pelo mecanismo de atendimento dado por uma taxa de clientes atendidos (μ) por unidade de tempo, deixando o cliente o sistema de filas quando o atendimento é finalizado (HILLIER; LIEBERMAN, 2013; TAHA, 2008).



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de TAHA (2008)

Dessa maneira, de acordo com as características das distribuições de probabilidade entre atendimento e tempo de atendimento, têm-se diversos modelos de teorias de filas. Por padronização, Taha (2008) indica a seguinte notação para resumir essas características de sistema de filas:

$$(a/b/c): (d/e/f) \quad (2.2)$$

Onde:

a – Distribuição de chegadas;

b – Distribuição de partidas (tempo de atendimento);

c – Número de servidores/atendentes;

d – Disciplina da fila;

e – Número máximo (finito ou infinito) permitido no sistema (na fila e em atendimento);

f – Tamanho da fonte de usuários finitos ou infinitos.

Hillier e Lieberman (2013) afirmam que as características operacionais de uma fila são números ou indicadores de desempenho calculados para um dado modelo de filas adotado. Dentre as medidas de desempenho citadas por diversos autores, as seguintes variáveis foram escolhidas na definição e cálculo de desempenho de um sistema de filas, a partir da seguinte terminologia (ver tabela 1):

Tabela 1 – Terminologia modelo de filas

Notação	Definição
λ	Taxa média de chegada (número de chegadas esperado por unidade de tempo) de novos clientes.
μ	taxa média de atendimento para o sistema global (número de clientes esperado completando o atendimento por unidade de tempo) quando n clientes se encontram no sistema.
S	número de atendentes (canais de atendimento paralelos) no sistema de filas
P_n	Probabilidade de que haja n clientes esperando ou sendo atendidos no sistema, quando o sistema atingiu a condição de estado estável
$N(t)$	O número de clientes no sistema de filas no instante t
$P_n(t)$	A probabilidade de exatamente n clientes se encontrarem no sistema de filas no instante t , dado o número no instante 0 ;
Medidas de desempenho	
$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	taxa de utilização para a instalação de atendimento; é uma medida de congestionamento do servidor; ou seja, a fração de tempo esperada em que atendentes individuais se encontram ocupados.

w	Tempo médio de espera no sistema (incluindo o tempo de atendimento) para cada cliente individual
w _q	Tempo médio de espera da fila (exclui o tempo de atendimento) para cada cliente individual
L	Número médio de clientes no sistema
L _q	Comprimento médio da fila (exclui clientes que estão sendo atendidos)

Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Taha (2008) e Moreira (2007)

A relação entre L_q e W_q é conhecida como fórmula de Little, que consiste em uma analogia com a fórmula de Física Fundamental, *Distância = velocidade × tempo*, aplicados no sistema de filas, dada pelas fórmulas:

$$L_q = \sum_{n=s}^{\infty} (n-s)P_n = \lambda W_q \quad (2.3)$$

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} nP_n = \lambda W \quad (2.4)$$

O processo de fila pode ser representado em dois modelos elementares de filas de espera baseia-se no processo de nascimento e morte (markoviano). O modelo de nascimento puro, em que somente chegadas são permitidas, e o modelo de morte puro, no qual só ocorrem partidas dos clientes (FERRARI, 2008). Os processos de formação de fila podem ser descritos probabilisticamente ou através da distribuição exponencial e poisson, diante de um intervalo de tempo entre chegadas no modelo de nascimento puro e o intervalo de tempo entre partidas no modelo de morte puro (TAHA, 2008).

O modelo M/M/s parte do pressuposto de que existe uma entrada de Poisson, tempos de atendimento exponenciais e que o número de atendentes seja s um inteiro positivo. Consequentemente, esse modelo é simplesmente o caso especial do processo de nascimento-e-morte (cadeia de Markov de tempo contínuo), em que a taxa média de chegada e a taxa média de atendimento por atendente ocupado do sistema de filas são constantes (λ e μ , respectivamente), independente do estado do sistema.

Para sistemas com vários atendentes ($s > 1$), quando μ excede a taxa média de chegada λ , isto é, quando $\rho = < 1$ um sistema de filas que se ajusta a esse modelo vai, finalmente, atingir uma condição de estado estável. Para o caso específico com um único atendente, $s = 1$, os fatores C_n para o processo de nascimento-e-morte se reduz a:

$$C_n = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n = \rho^n \quad \forall \quad n = 1, 2, 4... \quad (2.5)$$

Logo,

$$P_n = \rho^n P_0 = (1 - \rho)\rho^n \quad (2.6)$$

Tem-se,

$$L = \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \quad (2.7)$$

e

$$L = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} \quad (2.8)$$

Quando ocorre que $\lambda > \mu$, a fila “explodiria” e cresceria sem limites, mesmo quando $\lambda = \mu$, o número de clientes esperado no sistema de filas cresce lentamente sem limites ao longo do tempo, pois, embora um retorno temporário para nenhum cliente presente sempre é possível, as probabilidades de números imensos de clientes presentes se torna significativamente maior ao longo do tempo.

Para o caso $\lambda < \mu$, pode-se obter a distribuição probabilística do tempo de espera no sistema para uma chegada aleatória quando a disciplina da fila é aquela nos quais os primeiros que chegam serão os primeiros a ser atendidos. Se essa chegada encontrar n clientes já no sistema, a chegada terá de esperar ao longo dos $n+1$ tempos de atendimento exponenciais, inclusive o seu próprio. Para esses casos, o tempo de espera no sistema (inclui o tempo de atendimento) para cada cliente individual é expresso por:

$$P\{W > t\} = e^{-\mu(1-\rho)t} \quad \forall t \geq 0 \quad (2.9)$$

Por consequência,

$$W = E(W) = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (2.10)$$

Considerando o tempo de espera na fila (excluindo o tempo de atendimento) (W_Q) para uma chegada aleatória quando a disciplina da fila for aquela em que os primeiros que chegam serão os primeiros a ser atendidos, se essa chegada não encontrar nenhum cliente já no sistema, ela será atendida imediatamente, de modo que:

$$P\{W_Q = 0\} = P_0 = 1 - \rho \quad (2.11)$$

Se, ao contrário, essa chegada encontrar $n > 0$ clientes já na fila, então a chegada tem de esperar por n tempos de atendimento exponenciais até que seu atendimento comece, de forma que:

$$P\{W_q > t\} = \rho e^{-\mu(1-\rho)t} \quad (2.12)$$

Obtendo a média da distribuição de:

$$W_q = E(W_q) = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (2.13)$$

2.1.5. Simulação baseado em agente

A modelagem matemática de ambientes geralmente sintetiza o comportamento de situações reais e, por isso, exige um esforço significativo para a caracterização das particularidades e dos atributos correspondentes aos parâmetros e variáveis do problema (WOLFRAM, 2020; CUEVAS, 2020; RIOU EALTHAUS, 2020; SANCHE ET AL., 2020; WU ET AL., 2020), principalmente quando se trata de situações de perigos e incertezas, que envolvem variáveis comportamentais de um conjunto de pessoas, diferentes níveis de vulnerabilidade, intensidade em que são afetados pelas consequências dos desastres, além das incertezas meteorológicas e climatológicas.

Através da simulação computacional, por meio de modelos e técnicas computacionais, é possível simular o comportamento do sistema real de interesse e conduzir experimentos com o objetivo de entender o comportamento de um sistema ou avaliar sua operação (NETO; OLIVEIRA; ANDRADE, 2014). Nascimento et al. (2014) apontam que a simulação computacional de um sistema complexo é de suma importância no que concerne à tomada de decisão e, para isso, urge a necessidade de um modelo que vise retratar a complexidade da realidade de uma forma mais abrangente.

Cenários que envolvem o planejamento, gestão e avaliação de políticas públicas, como as situações de emergência de desastres por enchentes, requerem uma análise detalhada, baseada em experiências e que considerem variadas perspectivas. A diversidade, do ponto de vista científico, é considerada na análise de políticas públicas quando são incluídas múltiplas dimensões de riscos e, portanto, a visão e contribuição de diferentes profissionais (IPEA, 2014).

Conforme Grigoryev (2015), a simulação computacional busca efetuar análises do comportamento do sistema sob condições específicas, buscando o encaminhamento de uma solução a um dado problema do mundo real, através da simplificação do problema em um ambiente seguro dos riscos do mundo real (ver figura 6). O autor destaca ainda que a simulação pode ser usada para prever o estado de um sistema em algum ponto no futuro,

baseado nas suposições sobre seu comportamento atual e de como continuará se comportando ao longo do tempo e as razões mais comuns para experimentar-se com modelos simulados são: o sistema real ainda não existe; experimentar com o sistema real é muito caro ou leva muito tempo; e experimentar com o sistema real não é apropriado.

Figura 6 – Esquema da modelagem como solução de problemas



Fonte: O Autor (2021)

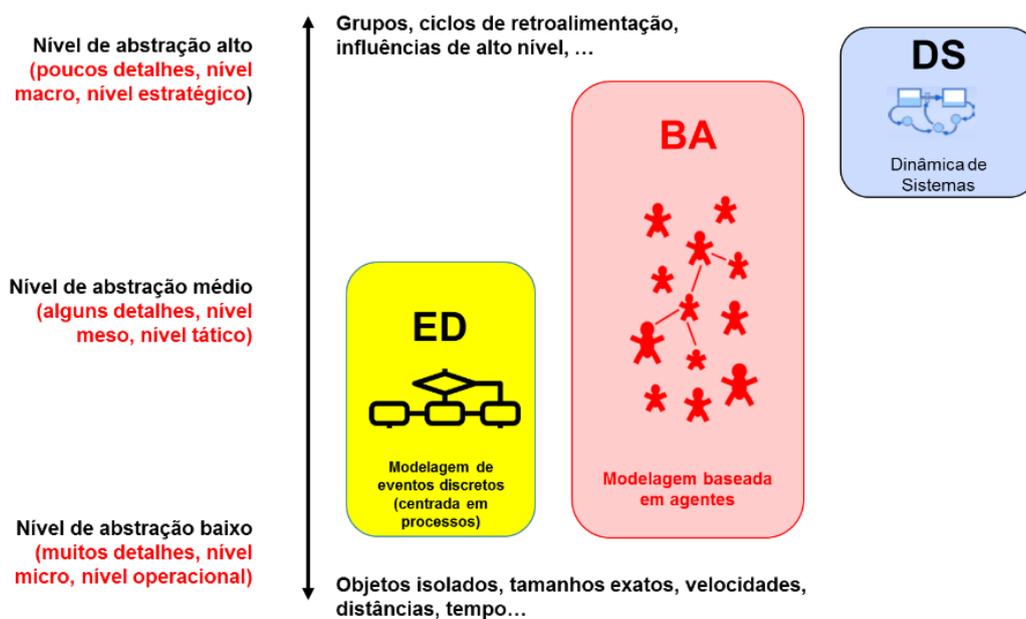
Nota: Adaptado de Grigoryev (2015)

Essas estratégias de representação computacional para desastres naturais e políticas públicas são abordados na literatura ainda com certa escassez a ser detalhado na subseção 2.2.2, porém existem diversas alternativas para a modelagem de sistemas complexos capazes de representar o processo de gerenciamento de risco, incluindo modelos matemáticos associados a MCDM (Da Silva et al., 2020; ZHU et al., 2021), algoritmos de aprendizagem de máquina (ANDARYAN et al, 2021), em problemas de crise de alta complexidade como desastres hidrológicos (ZOU; FERNANDES; CHEN, 2021; HASSANPOUR; RASSAFI, 2021) ou epidemiológico, como o da pandemia da COVID-19 (KEER et al., 2021; KANO et al, 2021), por exemplo.

De acordo com Van Dam et al (2012), os modelos de simulação atuais utilizam três métodos: eventos discretos, modelagem baseada em agentes e dinâmica de sistemas. Cada método se aplica a uma gama específica de níveis de abstração. Como é possível visualizar na figura 7, a dinâmica de sistemas pressupõe um nível de abstração alto e é normalmente usada para a modelagem estratégica. Eventos discretos suportam abstrações de níveis médio e baixo. No meio, estão os modelos baseados em agentes, que podem

variar de modelos muito detalhados, nos quais agentes representam objetos físicos, a modelos altamente abstratos, em que agentes são empresas ou governos concorrentes.

Figura 7 – Diferentes métodos de simulação em função do nível de abstração.



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Abar et al. (2017)

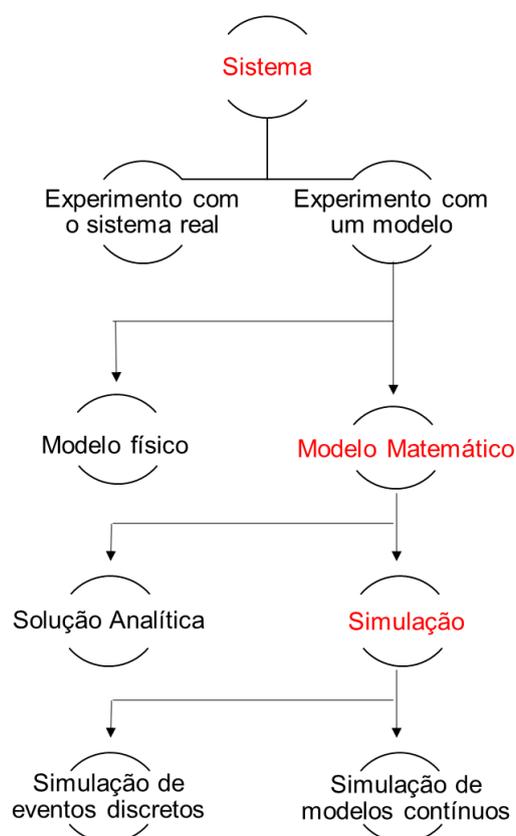
Uma destas alternativas é uma ferramenta numérica de representação computacional, também conhecida como *Agent-Based Modeling and Simulation* (MBAS) (ABAR et al., 2017), que permite entender o comportamento de diversos agentes autônomos interagindo entre si, em cenários de risco, bem como projetar, testar e avaliar diferentes tipos/níveis de intervenções no sistema, considerando os cenários e as condições de interesse.

Conforme Bonabeau (2002), na modelagem baseada em agentes, o sistema é modelado como uma coleção de entidades autônomas de tomadas de decisão chamadas agentes. No nível mais simples, um modelo baseado em agentes consiste de um sistema de agentes e as relações entre estes. Segundo Aguilar et al. (2003), a simulação baseada em agentes se esforça em substituir atores individuais ou grupos de um determinado sistema por representações de software destes atores (ou grupos).

Um sistema pode ser entendido como um conjunto de entidades que agem e interagem mediante um propósito. Sua complexidade se dá devido aos diversos fatores externos que podem afetar este sistema. Logo, a fronteira de estudo deve ser delimitada pelo modelador de acordo com sua finalidade. Existem diversas abordagens para se desenvolver estudos de sistemas complexos (ver figura 8) (LAW; KELTON, 1991;

WINSTON, 1993).

Figura 8 – Abordagens para estudos de modelos de sistemas



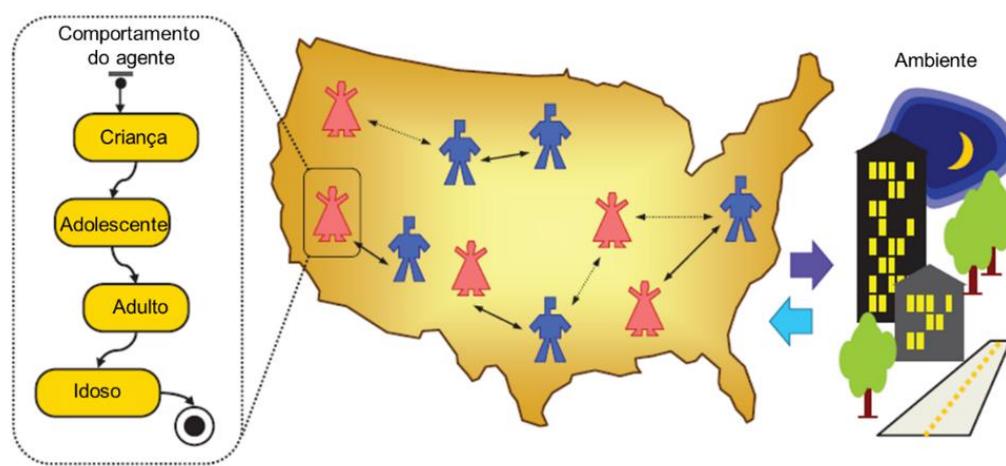
Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Law e Kelton (1991); Winston (1993).

O presente trabalho utiliza a modelagem matemática associada a simulação diante dos fatores do problema no mundo real, cuja complexidade pode tornar inviável a utilização apenas dos métodos matemáticos de solução analítica, haja vista que a Simulação baseada em Agente traz consigo possibilidades de incorporar a representação de fatores humanos nos modelos, possibilitando ao modelador outra forma de ver o sistema, sendo uma ferramenta capaz de fornecer dados que podem ser incorporados aos modelos de decisão multicritério.

De acordo com Abar et al. (2017), não existe uma linguagem padrão para a modelagem baseada em agentes. A sua estrutura vem de editores gráficos ou scripts. Geralmente, o comportamento do agente é especificado a partir da noção inicial do agente do seu estado e, assim, suas ações e reações dependem desse estado; por conseguinte, o comportamento é mais bem definido com diagramas de estados. Às vezes, o comportamento é definido por regras e/ou executadas por eventos especiais. (ver figura 9)

Figura 9 – Diagramas de estados de um agente



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de Grigoryev (2021)

Segundo Grigoriev (2015), os agentes em um modelo baseado em agentes podem representar diversas coisas: veículos, peças de equipamento, projetos, produtos, ideias, organizações, investimentos, lotes de terra, pessoas em diferentes papéis, etc., e podem ser consideradas as seguintes características:

1. Agentes não são autômatos. Agentes não precisam viver em um espaço discreto (como a grade do Jogo da Vida, ("The Game of Life", s.d.)), e o espaço não faz parte de muitos modelos baseados em agentes. Quando é preciso representar espaço, normalmente, ele é contínuo, como um mapa ou as instalações de uma planta baixa.
2. Agentes não são necessariamente pessoas. Qualquer coisa pode ser um agente: um veículo, uma peça de equipamento, um projeto, uma ideia, uma organização ou até mesmo um investimento. Um modelo de fábrica de transformação de aço, no qual cada máquina é modelada como um agente e suas interações produzem aço, forma um modelo baseado em agentes.
3. Um objeto que parece ser totalmente passivo pode ser um agente. É possível modelar uma tubulação em uma rede de fornecimento de água como um agente e depois associar cronogramas de manutenção e troca, custos e eventos de deterioração a ela.
4. Um modelo baseado em agentes pode ter muitos ou poucos agentes. O modelo pode ter também um ou vários tipos de agentes.
5. Existem modelos baseados em agentes nos quais os agentes não interagem. A economia da saúde, por exemplo, utiliza o uso do álcool, obesidade e modelos de doenças crônicas em que a dinâmica individual depende somente dos parâmetros

pessoais e, algumas vezes, do ambiente.

Logo, um desafio comum a todas as técnicas de modelagem é a construção do modelo em um nível correto de descrição dos fenômenos, usando uma quantidade adequada de detalhes para servir ao seu propósito. Outro desafio envolve a utilização da MBA nas situações de eventos extremos, que geralmente envolvem seres humanos com comportamentos potencialmente irracionais, de escolhas subjetivas e psicologia complexa, aspectos difíceis de quantificar, calibrar e muitas vezes justificar. Mais um desafio está relacionado à própria definição da MBA, a qual trata um sistema no nível de suas unidades constituintes, o que exige elevado poder computacional e tempo para simulação do modelo, conforme a escala e a complexidade modelada.

A seguir é detalhada a contextualização do problema abordado e uma breve revisão sistemática da literatura que subsidia informações inerentes ao estado da arte e, subsequentemente, norteará o posicionamento do modelo proposto nesta pesquisa.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Diferentes autores definem estruturas diferentes para condução de uma revisão sistemática da literatura. De acordo com Jin et al. (2014), uma revisão sistemática de literatura pode ser utilizada como metodologia de pesquisa, bem como análise do estado da arte para posicionamento da pesquisa, a partir dos seguintes passos:

1. Formular as questões e palavras chaves;
2. Escolher a base de dados a ser utilizada e o método de pesquisa;
3. analisar qualitativamente os estudos para excluir os que não estão dentro do escopo da pesquisa (ver figura 2.13); e
4. Iniciar a extração e sintetização dos dados.

A presente pesquisa buscou identificar de que maneira se realizam simulações baseada em agente incorporadas a métodos de decisão multicritério no campo de gerenciamento de risco em desastres naturais de enchentes (ver figura 10). Para a condução da pesquisa, foram determinadas quais as problemáticas da pesquisa. A partir delas, surgem as seguintes questões de pesquisa:

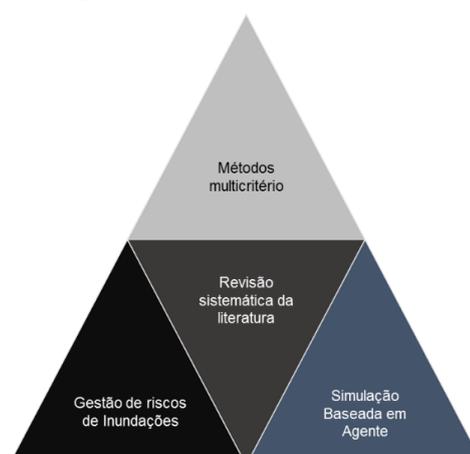
Q1: Qual a quantidade de pesquisas associadas ao tema que foram publicadas nos últimos 5 anos (2016-2021)

Q2: Quais os principais tipos de abordagem de decisão?

Q3: Quais os critérios são considerados no processo de decisão?

Q4: Quais métodos multicritério são utilizados no contexto de gerenciamento de riscos de inundações?

Figura 10 – Escopo da pesquisa



Fonte: O Autor (2021)

As buscas foram realizadas na base *Web of Science Core Collection*, encerradas

em setembro de 2021. A escolha foi motivada devido a vasta coleção disponibilizada, assim como a popularidade em trabalhos de revisão. Os artigos considerados para a revisão foram publicados em periódicos e disponibilizados através da *Web of Science Core Collection*. De acordo com Huh (2018), essa coleção é mantida por *Clarivate Analytics*, como uma base de dados para pesquisas. Foram utilizados diferentes critérios para filtrar quais artigos estavam dentro do escopo.

Ainda com o objetivo de garantir a qualidade dos trabalhos analisados, foram estabelecidos os critérios de inclusão descritos a seguir:

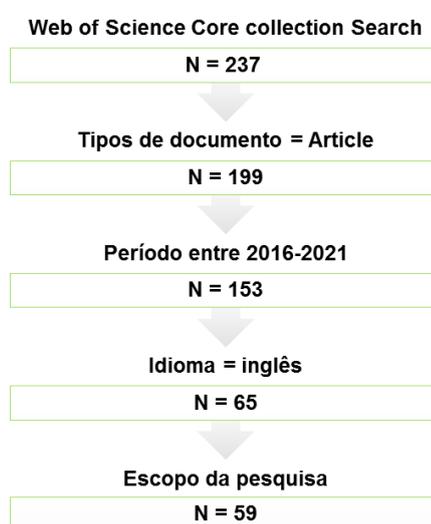
- Apenas artigos publicados em língua inglesa;
- Periódicos com mais de 2 artigos publicados;
- Trabalhos publicados nos últimos 5 anos (2016 – 2021);
- Estudos dentro do escopo da pesquisa.

3.1 Análise dos métodos utilizados para o gerenciamento de riscos de enchentes

Inicialmente, foram combinadas as palavras chaves do escopo da pesquisa (figura 3.1). Contudo, o quantitativo foi baixo, resultando em apenas 2 artigos. Então, as buscas foram realizadas com as combinações separadas das palavras chaves em pares.

Na primeira busca, foram delimitadas as palavras-chaves apenas para os campos de métodos multicritério e Gerenciamento de riscos de inundações, para entender quais as principais metodologias para lidar com estes desastres. As combinações de cada tópico (TS) para pesquisa avançada no *Web of Science* foram: $TS = ("Multicriteria" \text{ AND } "flood")$ OR $TS = ("flood \text{ risk management}" \text{ AND } "MCDM")$ OR $TS = ("flood \text{ risk assessment}" \text{ AND } "MCDM")$. Ao aplicar os filtros, chegou-se ao quantitativo de 65 artigos (ver figura 11).

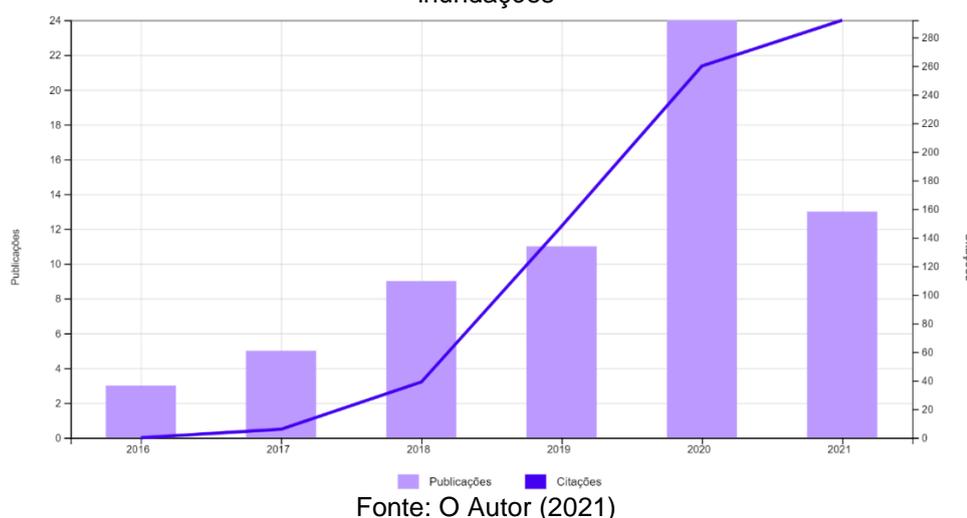
Figura 11 - Filtros aplicados na primeira busca



Fonte: O Autor (2021)

Com base na análise, observa-se que a evolução de artigos publicados na área de gerenciamento de riscos de inundações utilizando métodos multicritério, nos últimos cinco anos (2016-2021), foi crescente, bem como as citações, com maior pico, consideradas até 2020. Isso reforça a relevância do tema, tendo em vista a necessidade do debate e ampla discussão técnico-científica na construção de soluções de mitigação, prevenção e enfrentamento dos riscos de desastres naturais. (gráfico 4)

Gráfico 4 - Evolução ao longo dos 5 anos da busca relacionada a MCDM e Gerenciamento de riscos de inundações



Constatou-se trabalhos publicados utilizando Métodos multicritério em gerenciamento de riscos de inundações propondo modelos baseado em GIS (ver figura 12) para avaliar risco, suscetibilidade e vulnerabilidades das regiões afetadas, no sentido de apoiar as decisões relacionadas a prevenção, mitigação e monitoramento de eventos de inundação. Em outros termos, identifica-se uma tendência das pesquisas em propor modelos de avaliação de riscos e cenários antes da ocorrência do evento extremo, com o objetivo de identificar e mapear as áreas de perigo, como já evidenciado em revisões sistemáticas de literatura como em Da Silva, Alencar e De Almeida (2020), De Brito e Evers (2016) e em Abdullah, Siraj, e Hodgett (2021). Os dados apontam para a popularidade do uso de métodos como AHP. Trabalhos semelhantes a esta pesquisa, como o de Yu et al. (2018), trazem o AHP como proposta de modelo. A grande maioria dos trabalhos analisados justificam a utilização deste método por ser um método MCDM amplamente utilizado pela literatura.

Além disso, conforme mostra a figura 12, existe um número expressivo de termos relacionados a técnicas de Inteligência Artificial, em sua maioria. Os estudos, que são detalhados a seguir, apresentam algoritmos de *Machine Learning* e *Deep Learning*, com redes neurais capazes de monitorar as informações georreferenciadas, como suscetibilidade, vulnerabilidade e índices de riscos de inundações e proporcionem aos gestores informações quase que em tempo real para monitoramentos e planejamento da

Tabela 2 - Métodos utilizados para o gerenciamento de riscos de inundações

Métodos	Número de Artigos
AHP	19
Fuzzy	8
MAUT	3
TOPSIS	3
Promethee	2
Abordagens baseada em Inteligência artificial	13
Abordagens baseada em GIS	11
total	59

Fonte: O Autor (2021)

A análise também aponta a frequente utilização de critérios que possuem fonte de dados determinísticos, somando quase 70% dos artigos sem considerar as incertezas e probabilidades associadas a natureza do problema de eventos de inundação.

3.2 Análise das abordagens da simulação baseada em agente para o gerenciamento de riscos de enchentes

Em seguida, uma segunda busca foi realizada através da combinação de palavras-chaves, no intuito de investigar o uso dos modelos de simulação baseado em agente em apoio a gestão de riscos de inundações (ver quadro 1).

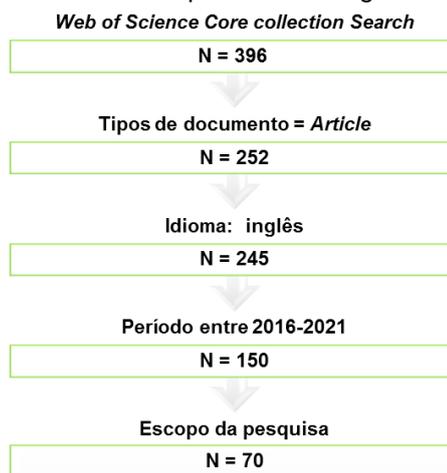
Quadro 1 – palavras-chaves de gestão de riscos de inundações e simulação baseada em agente.

<i>Gestão de Riscos de Inundações</i>	<i>Simulação Baseada em Agente</i>
"Flooding"; "Flood Forecasting"; "flood risk management"; "Flood Risk Assessment"; "Floodwater"; "flood"; "inundation"; "Natural disaster"	"Agent Based Simulation"; "Agent Based Modeling"; "Emergency evacuation simulations"; "multi-agent system"; "Multi-agent computing"; "hydrological related problems"

Fonte: O Autor (2021)

A busca retornou um total de 396 artigos. Após revisar o escopo e utilizar palavras-chave do grupo de enchentes e simulação baseada em agente, foram encontrados 369 artigos, dos quais foram excluídos tipos de documentos que não eram artigos, como, por exemplo, capítulos de livros. Foram analisados apenas artigos em inglês em periódicos que publicaram ao menos 2 artigos sobre o tema em estudo. Após a utilização desses critérios (ver figura 13), foi feita uma análise do conteúdo dos artigos através dos abstracts para selecionar apenas estudos dentro da área da pesquisa. Por fim, foram obtidos 70 artigos que vieram a ser analisado de maneira mais detalhado.

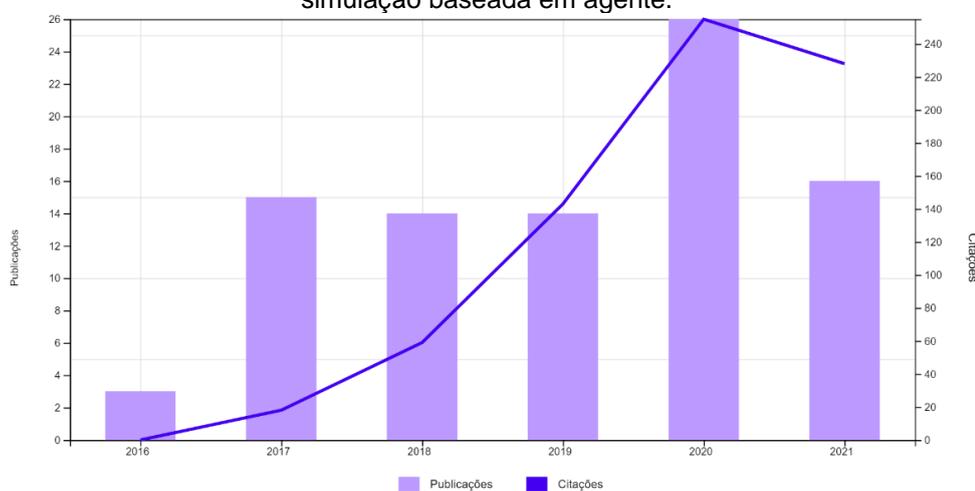
Figura 13 - Filtros aplicados na segunda busca



Fonte: O Autor (2021)

A evolução de publicações ao longo dos 5 anos se deu de uma maneira mais constante, apesar de apresentar um pico de publicações e citações em 2020. Aqui também cabe uma interpretação semelhante, em direção da relevância do tema e da necessidade da construção de soluções de enfrentamento de crises ocasionadas pelos desastres naturais (ver gráfico 5)

Gráfico 5 - Evolução ao longo dos 5 anos dos artigos relacionados a de gestão de riscos de inundações e simulação baseada em agente.



Fonte: O Autor (2021)

Os resultados dessa busca, conforme é visualizado na rede de ocorrência de palavras a seguir (figura 14), são representados em clusterização das principais abordagens dos trabalhos analisados, seja através da análise do comportamento individual de evacuação, análise de danos e perdas; das medidas de monitoramento, prevenção e mitigação; das políticas de enfrentamento e elaboração de planos de emergências; das estratégias de logística humanitária; da recuperação de infraestrutura e financeira; além das análises de riscos e perigos climáticos e meteorológicos. Em suma, as abordagens de decisão estão direcionadas para a simulação de eventos de inundação e, por conseguinte, análises de interações do comportamento humano individual e dos órgãos durante a crise,

As abordagens de logística humanitária podem abranger as interações entre a simulação de eventos de inundações com as regras comportamento dos residente e das instituições governamentais, como em Yang et al.(2020), ou apenas analisar e planejar os regastes e socorros e ações de alocação de recursos para socorrer os afetados já evacuados em zonas seguras (TONN et al., 2020; EIVAZY; MALEK, 2019; GHAVAMI; MALEKI; ARENTZE, 2019)

Apenas 3 trabalhos avaliam a recuperação da infraestrutura e financeira, que é um ponto importante de abordagem, pois tais análises permitem uma melhor compreensão de quais serão as possíveis dinâmicas e desafios que os agentes deverão enfrentar (KOUTIVA et al., 2020; JOSHI et al., 2020; BHAMIDIPATI et al., 2016).

Da mesma forma, apenas os trabalhos de Yang et al (2017), Aziz et al (2017) e Kwak e lwami (2016) utilizam a simulações para analisar as frequências de ocorrências, mapear e analisar os riscos climáticos e meteorológicos. O mesmo quantitativo de trabalhos estão relacionados estritamente a decisões comportamentais de pedestres durante os eventos extremos, seja por meio da simulação do comportamento do motorista durante um período de enchente urbana (ZHU et al, 2018) ou comportamento de evacuação e proteção individual (BELL et al., 2021; MICHAELIS; BRANDIMARTE; MAZZOLENI, 2020).

3.3 Principais limitações das abordagens analisadas

Apesar de ter uma frequência relevante de termos como tomada de decisão, análise de decisão e processo decisório, apenas o trabalho de Koc et al., (2020) incorpora a estrutura dos métodos de decisão multicritério em seu *framework*. Contudo, a abordagem utiliza o método AHP que, na maioria dos trabalhos analisados, no contexto de inundação, usam-se critérios de natureza determinística e limitações em incorporar as incertezas inerentes ao cenário (ver quadro 2). Esta limitação em relação a incerteza também é evidente na análise da busca relacionada aos métodos multicritério em inundações.

Quadro 2 – principais características dos artigos que utilizam MCDM/A no contexto de inundação.

Dimensões	Natureza	Artigos	Limitações
Características populacionais	Determinísticos	Fernandez, Mouratob E Moreira (2016); Abdrabo Et Al. (2020); Luu E Von Meding (2018); Luu Et Al. (2020); Gudiyangada Nachappa, E Meena (2020); Abdelkarim, Et Al (2020); Boulomytis. Zuffo, E Imteaz (2019, 2020); Domakinis Et Al (2020); Skilodimou, Bathrellos E	Não consideram as incertezas do cenário; Dificuldade de aquisição de dados e com a elicitación das preferências dos decisores.
Características urbanas e residenciais			
Densidade populacional			
Uso da terra			
Densidade e duração da Inundação			
Número de rotas			

Serviço médico		Alexakis (2021); Bandi, Meshapam E Deva (2019); Allafta E Opp (2021); Mishra E Satapathy (2021); Gigovic Et Al (2021)	
Índices sócio-econômicos			

Fonte: O Autor (2021)

Ademais, outra dificuldade relatada nos trabalhos diz respeito às perguntas para avaliação intracritério, diante do esforço que se exige do decisor não acadêmico para responder aos inúmeros questionamentos, como por exemplo aqueles relacionados a avaliação par a par das alternativas, elicitación de pesos ou limiares de preferências, de acordo com cada método proposto.

Esta limitação acaba dificultando o processo de construção do modelo e podendo aumentar o viés. Os métodos baseados a teoria da utilidade multiatributo, por outro lado, possuem a vantagem de não exigir tanto do decisor, já que as perguntas feitas são em menor quantidade e de maneira simplificada, através do processo de escolhas por loterias. Ademais, tanto para contextos de riscos em geral e quanto, especificamente, riscos de inundações, a estrutura axiomática do MAUT permite o adequado tratamento da incerteza através da modelagem probabilística.

4 MODELOS DESENVOLVIDOS PARA GERENCIAMENTO DE DESASTRES DE INUNDAÇÕES

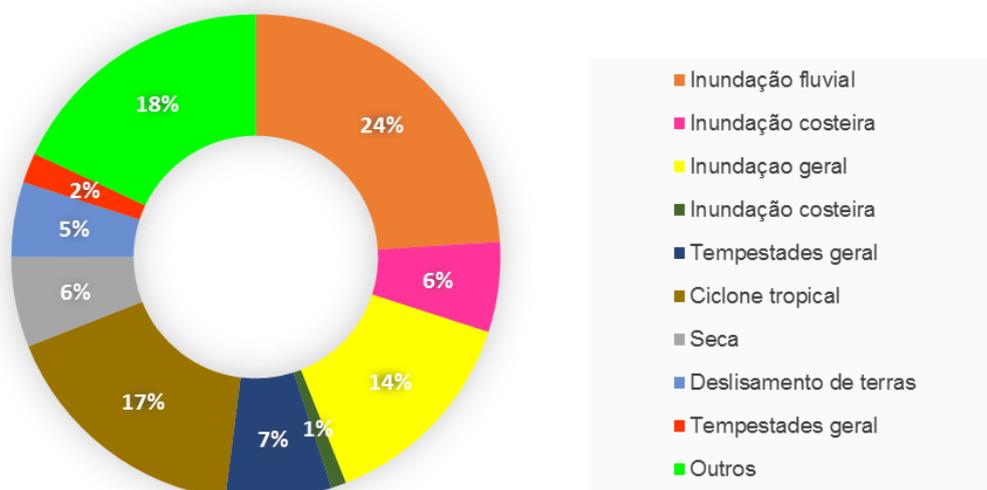
Nesta seção são apresentados os dois modelos propostos nesta dissertação, elaborados para apoiar o gerenciamento de riscos de desastres de inundações, através da elaboração de planos de contingência, evacuação e resposta emergencial a estes eventos extremos. A primeira proposta consiste em um modelo multicritério baseado em MAUT, para indicar os melhores locais a serem utilizados como abrigos emergenciais temporários. A segunda proposta consiste em um modelo baseado em agente, que incorpora a solução analítica do primeiro modelo para simular a evacuação e ações operacionais de assistência humanitária.

4.1 Contextualização do problema

Os desastres naturais que estão relacionados a riscos climáticos, meteorológicos, hidrológicos, são os mais expressivos em números, 91% do total dos desastres ocorridos no mundo (MATA-LIMA et al., 2016), sendo a inundação o tipo mais frequente, entre o período de 2000 a 2020, representando 43% de todos os eventos registrados (CRED, 2021). As catástrofes de inundação é um fenômeno global que afeta tanto os países em desenvolvimento (dito emergentes) quanto os desenvolvidos da Europa e os Estados Unidos (ZOU et al., 2012, ZOU; FERNANDES; CHEN 2021; ŠPITALAR et al., 2014), provocando significativos danos econômicos e vítimas humanas (MATA-LIMA et al., 2016).

Segundo o recente relatório da Organização Meteorológica Mundial – OMM (2021), eventos extremos relacionados a mudança clima, ao clima ou hidrológico, ocorreu todos os dias, em média, nos últimos 50 anos (1970 – 2020), sumarizando mais de 11.000 desastres relatados atribuídos a esses perigos em todo o mundo, com pouco mais de 2 milhões de mortes e US \$ 3,64 trilhões em perdas.

O relatório é a revisão mais abrangente da mortalidade e perdas econômicas por tempo, água e extremos climáticos até hoje. O documento avalia um período de 50 anos, assim como as tendências por década. De 1970 a 2019, os riscos meteorológicos, climáticos e hídricos foram responsáveis por 50% de todos os desastres, 45% de todas as mortes relatadas e 74% de todas as perdas econômicas relatadas. (OMM, 2021). No gráfico 6 é possível verificar as maiores porcentagens para desastres de inundação, além de alguns outros desastres naturais significativos como ciclones e tempestades severas também provocarem inundações nas regiões afetadas.



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptada de OMM (2021)

De acordo com o G1 (2019), em 2019, pelo menos 15 desastres naturais relacionados às mudanças climáticas causaram, cada um, destruição que custou mais de um US\$ 1 bilhão em 2019, e sete deles atingiram a marca dos US\$ 10 bilhões: as inundações no norte da Índia e o tufão Lekima, na China (US\$ 10 bilhões cada); o Furacão Dorian, na América do Norte (US\$ 11,4 bilhões); as inundações de junho a agosto na China (US\$ 12 bilhões); inundações no meio-oeste e sul dos Estados Unidos (US\$ 12,5 bilhões); o tufão Hagibis, no Japão, em outubro, (US\$ 15 bilhões); e os incêndios florestais na Califórnia, de outubro a novembro (US\$ 25 bilhões).

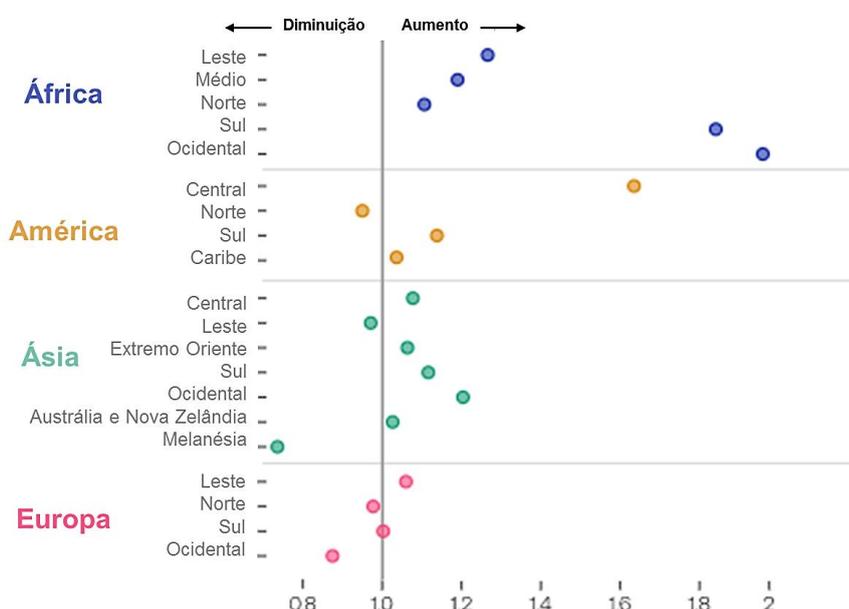
Segundo Tellman et al. (2021), houve um aumento proporcional de pessoas expostas a enchentes, registrando um crescimento mundial de 24% em comparação com o ano de 2020. Agora, cerca de 86 milhões de pessoas podem ter seus bens e vida impactados pelas consequências do aquecimento global e as enchentes surgem como o desastre climático mais severo e ameaçador para os países.

Os autores ainda afirmam que as inundações prejudiciais têm aumentado em gravidade, duração e frequência, devido a mudanças no clima, uso do solo, infraestrutura e demografia da população. Estima-se que, de 2000 a 2019, ocorreram globalmente prejuízos de US\$ 651 bilhões de dólares em inundações (EM-DAT, 2021). Os investimentos em adaptação às inundações, alocados para preparação, mitigação, adaptação e enfrentamento das crises, reduzem a mortalidade e as perdas de ativos. O relatório da OMM (2021) afirma que tais práticas de preparação, alerta precoce e gerenciamento de desastres aprimorados têm diminuído quase três vezes o número de mortes, apesar de o número de desastres ter aumentado cinco vezes ao longo do período de 50 anos, devido às mudanças climáticas e condições climáticas mais extremas.

Segundo o *Global Flood Database* (2021), tal aumento não foi distribuído

uniformemente pelo mundo. Os países com maior exposição às inundações concentraram-se na Ásia, África Subsaariana, América Central e do Sul, locais com elevados índices populacionais, enquanto os países da América do Norte e da Europa exibem principalmente uma exposição estável ou menor às inundações. (Ver gráfico 7).

Gráfico 7 – Mudança na proporção observada de população afetada nas duas últimas décadas



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de *Global Flood Database* (2021)

Outro fator agravante para o aumento dessas exposições aos riscos de desastres se dá devido ao crescimento espacial urbano desordenado que, por sua vez, tem criado municípios periféricos e gerado novos desafios na governança urbana (GENCER 2013). Os mais pobres e periféricos, particularmente aqueles que vivem em assentamentos informais, são desproporcionalmente afetados pelos eventos extremos e, muitas vezes, carecem dos recursos para se recuperar de desastres. Posse da terra, exclusão social, status étnico ou imigrante, educação e as oportunidades limitam sua mobilidade e reassentamento após desastres (UNIDRSS, 2020)

Dessa forma, países da América do Sul, Central e do Caribe estão entre os mais propensos a altos riscos, uma vez que 27% da população urbana vive em favelas (DODMAN et al. 2009), lugares em que a infraestrutura urbana é, geralmente, inadequada e precisa ser adaptada para suportar os impactos dos perigos e da mudança climática.

Entretanto, problemas de infraestrutura não afetam apenas os países mais pobres. Para países ricos, como Japão e EUA, a resseguradora suíça Swiss Re tinha uma primeira estimativa anual avaliada em US\$ 140 bilhões em perdas econômicas relacionadas a catástrofes e desastres humanos em 2019, contra US\$ 176 bilhões em 2018. Recentemente, uma tempestade severa varreu a costa leste dos Estados Unidos, deixando

pelo menos 46 mortos, mais de 25 casas destruídas ou danificadas, energia elétrica suspensa, além de estradas, edifícios e estações de metrô inundadas (CNN BRASIL, 2021).

O banco de dados da empresa Cloud to Street revelou que aproximadamente 2,23 milhões de quilômetros quadrados sofreram inundações entre 2000 e 2020, chegando a afetar até 290 milhões de pessoas. Quase 90% de todos esses eventos ocorreram em regiões do sul e sudeste asiático, impactando pessoas que se deslocaram para áreas propensas a desastres na tentativa de melhorar a qualidade de vida.

De acordo com a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico - OCDE (2007), os governos terão de gastar aproximadamente US\$ 71 trilhões até 2030 para fornecer infraestrutura adequada para eletricidade, transporte rodoviário e ferroviário, telecomunicações e água em todo o mundo, inclusive nos países desenvolvidos, a fim de sustentar a urbanização e crescimento populacional.

Estima-se que, até 2030, as mudanças climáticas adicionarão 25 novos países aos que já sofrem com enchentes regulares (UNIDRSS, 2020). Desse modo, urge a necessidade de um planejamento de crise que consiga captar e alocar investimentos em infraestrutura e suprimentos de recursos, o que, na maioria das economias em desenvolvimento, é insuficiente e, portanto, exige a parceria técnico-científica entre entidades públicas e privadas.

4.2 Desenvolvimento do modelo de decisão multicritério para seleção de abrigos emergenciais

Para uma alocação mais estruturada dos investimentos e recursos necessários na gestão de recursos emergenciais em cenários de crise, é necessário considerar, inicialmente, quais os locais são mais apropriados para o estabelecimento de uma zona segura e, por sua vez, a instalação de um abrigo temporário. Assim, deverão ser considerados alguns aspectos sob a ótica da segurança, do financeiro, da viabilidade operacional, das características externas do sistema, dos requisitos mínimos para abrigar e proteger a população afetada.

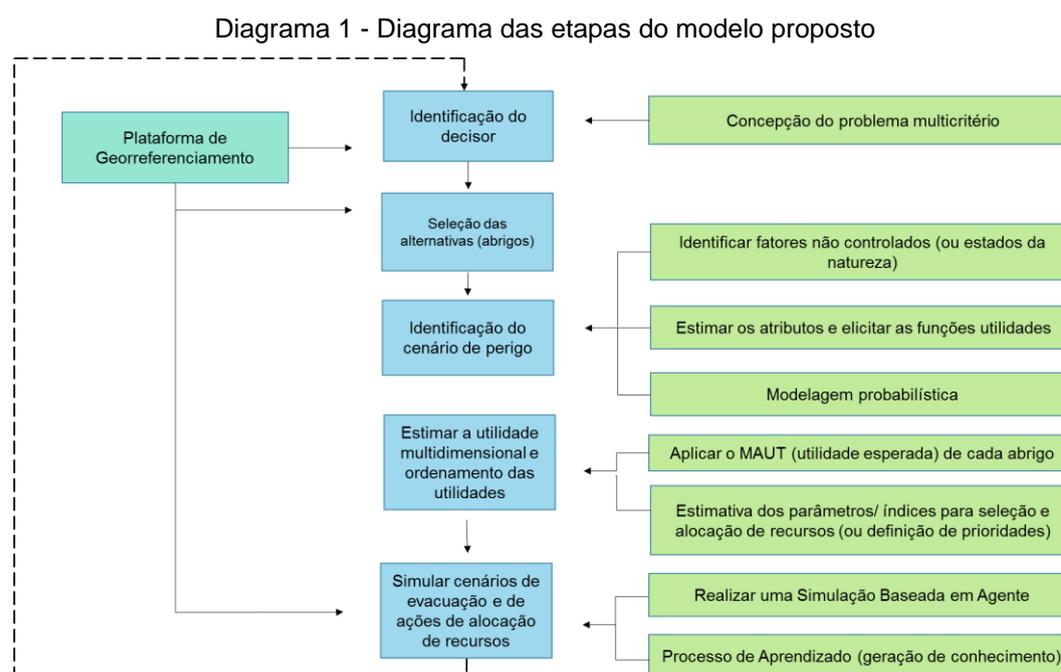
Para que o processo de decisão seja compatível e aplicável a cenários de crise, optou-se por utilizar uma abordagem que permita incorporar os diversos critérios envolvidos neste processo, bem como as preferências do decisor. Para Keeney & Raiffa (1976), as metodologias MCDM são adequadas para tais situações. Entre diversas problemáticas disponíveis (escolha, classificação, ordenamento), a necessidade de ordenamento emerge do decisor para construir uma lista das alternativas mais importantes em uma ordem que permitirá ao decisor prever quais os recursos e investimentos serão necessários em tal cenário e, assim, estar preparado para as crises, subsidiando um plano de contingência.

Neste caso particular, trata-se de uma hierarquia de risco, de modo que as alternativas representam os locais não afetados por inundações considerados no estudo.

Para definir uma hierarquia, em um contexto de risco, é importante dispor de modelos que levem em consideração as consequências a partir da ocorrência de um evento analisado. Como mencionado anteriormente, de acordo com a Aven (2012), a definição mais adequada de risco envolve a definição das consequências e incertezas. Portanto, a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) foi considerada nesta pesquisa como o método mais adequado ao contexto de risco, tendo em vista sua 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 desenvolvido baseia-se na Teoria da Decisão. O procedimento para construção do modelo proposto tem como base as 12 etapas apresentadas em De Almeida (2013) e De Almeida et al. (2015), que consistem em passos que o decisor deve construir em conjunto com o analista e os especialistas no que concerne ao ranqueamento das alternativas com melhor desempenho em termos de utilidade e, desse modo, selecionar os abrigos temporários emergenciais com base na modelagem probabilística. Nesta modelagem, considera-se que o pedestre consiga chegar até determinado local, para que o mesmo seja considerado um abrigo temporário emergencial.

Para auxiliar o processo de aplicação do modelo proposto, o decisor e/ou analista pode seguir o diagrama com a identificação das diversas etapas do modelo, conforme mostrado na Diagrama 1.



Fonte: O Autor (2021)

O uso de softwares de simulação Baseado em Agente (SBA) e sistemas de apoio à decisão (SAD) podem auxiliar no encaminhamento entre as etapas, de forma a tornar o

processo mais dinâmico e permitir ao decisor um estudo mais aprofundado de todas as etapas de análise de risco, que vão desde o levantamento de dados técnicos do sistema subterrâneo, caracterização do ambiente, definição dos cenários de perigo e a elicitación da estrutura de preferência do decisor, até a correta interpretação dos valores de utilidade na forma de ranking e seus resultados.

4.2.1 Caracterização dos decisores e objetivos

Inicialmente, a primeira etapa consiste na caracterização do(s) decisor(es) e outros atores que vão poder contribuir no processo de construção do modelo. O contexto e o modelo exigem que o problema seja estruturado adequadamente e sustentado pela premissa de que os *stakeholders* têm papéis bem definidos e não conflitantes, o que contribui para a confiabilidade do processo de tomada de decisão. A interação do decisor com os demais *stakeholders* permite elucidar quais objetivos serão alcançados através da resolução do processo. Além do mais, o decisor é responsável por delimitar estrategicamente a área urbana para a quais recursos e ações emergenciais devem ser direcionadas frente aos desastres de inundação devem ser avaliados.

Durante o processo de modelagem de decisão, os analistas e especialistas contribuem fornecendo informações técnicas para o decisor, para que haja uma melhor compreensão da natureza complexa e multidimensional do ambiente de gerenciamento de desastres. Na gestão do risco de desastres naturais, faz-se necessário considerar diversas dimensões, como, por exemplo, aquelas relacionadas a aspectos sociais, econômicos, ambientais e, principalmente, a preservação da vida (FERNANDES, 2010).

O decisor deve ser um gestor público que possua bom conhecimento acerca do risco das inundações, bem como sobre as políticas emergenciais de enfrentamento, de modo a representar a administração local e ser responsável pela tomada de decisão e, conseqüentemente, sua implementação. O papel do decisor será essencial, uma vez que o mesmo fornece informações preferenciais, expressa de maneira qualitativa e/ou quantitativas, que serão usadas para atingir os objetivos da organização, no tocante à solução do problema.

É de suma importância que o especialista seja um profissional experiente e com conhecimento técnico/científico a respeito do problema tratado. No âmbito analisado, esse ator pode ser um representante de órgãos de defesa civil, corpo de bombeiros, ONG's de ações comunitárias e gestores públicos. O especialista deve ter competência para explicitar seu conhecimento sobre o comportamento do estado da natureza através de uma distribuição de probabilidade, 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.

Como objetivo geral, o decisor visa gerenciar as ações emergenciais diante da ocorrência de desastres de inundações em áreas urbanas. Este objetivo central pode ser alcançado por exemplo por intermédio de objetivos-meio, desenvolvimento de planos de contingenciamento da defesa civil, estruturação de abrigos temporários emergenciais, alocação e distribuição de recursos emergenciais.

4.2.2 Levantamento das dimensões

O modelo de decisão multicritério proposto é baseado na teoria da utilidade multiatributo. Na literatura, os critérios são chamados de atributos ou dimensões. Nesse sentido, na etapa 3 são definidos as dimensões que devem representar os objetivos explicitados na etapa 2. O modelo proposto busca avaliar riscos considerando quatro dimensões de consequências, com base nas medidas de desempenho do processo de formação de filas em massa dos residentes, seguindo vias não afetadas pelas enchentes até os abrigos. De forma mais específica, na dimensão financeira, foi utilizado como base o orçamento do projeto de abrigo temporário desenvolvido por Moraes (2017). No gerenciamento de desastres de inundação, a fim de avaliar e ranquear as melhores consequências em termos capacidade de resposta a eventos extremos, as quatro dimensões consideradas são: viabilidade das rota (V_h), capacidade do abrigo (C_ρ), número de evacuados (L_h) e a dimensão econômica (E_f).

A seguir a descrição de cada uma destas dimensões:

- Dimensão de Viabilidade das Rota (V_h): Nesta dimensão será considerada a medida de desempenho de fila referente ao número médio de residentes na rota de evacuação (L_q), o que indicará que aquela rota não esteja obstruída.
- Dimensão de Capacidade do Abrigo (C_ρ): Nesta dimensão estima-se o fato de utilização do sistema, isto é, do abrigo, considerando a sua taxa de utilização (ρ).
- Dimensão do Número de Evacuados (L_h): Nesta dimensão será considerado o número médio de residentes dentro do abrigo (L), configurando o número de residentes evacuados.
- Dimensão Econômica (E_f): Nesta dimensão será considerado o orçamento de projetar os abrigos temporários emergenciais, com base no projeto considerado nessa pesquisa, levando em consideração o orçamento e a capacidade de atendimento de cada abrigo.

4.2.3 Identificação dos cenários de perigo e fatores não controlados

O cenário de Perigo (θ) será determinado com base na ocorrência de chuvas extremas ocasionando um evento extremo de desastres hidrológico de inundação, afetando as atividades socioeconômicas de uma determinada localidade. O *framework* da figura 4. apresenta a ocorrência de chuvas extremas e, subsequentemente, a geração da zona de perigo das áreas afetadas (áreas próximas aos rios e com base no mapa de risco de monitoramento dos órgãos responsáveis). As pessoas que estiverem nestas zonas de perigo, devem seguir rotas de evacuação até os locais propensos a se tornarem abrigos temporários.

O número de pessoas dentro da zona de perigo (θ) pode ser modelado pela Teoria das Filas (vide Seção 2.1.3). Considera-se a retenção do fluxo de pessoas em uma rota como um processo de formação de filas, na qual a quantidade de pessoas que se encontra naquele momento em determinada localidade é influenciada pela taxa de chegada de pessoas no abrigo, seguindo um processo de Poisson (λ), onde a taxa de atendimento das mesmas (pessoas evacuadas) é considerada como uma exponencial (μ). Por exemplo, em uma região afetada pela inundação, as vias podem ser obstruídas, ficando o fluxo de tráfego nestas vias desordenado. Desta forma, o tempo de atendimento pode aumentar devido a dificuldade das pessoas em chegar e entrar em um determinado abrigo.

Dessa forma, pode-se aplicar o modelo M/M/1 definido pela Teoria das Filas no contexto analisado. Considerando que se tem um fator de utilização ($\rho < 1$), tem-se um número finito de pessoas na fila (rotas de evacuação), que, no caso específico, se pode considerar um número finito de pessoas dentro da zona de perigo. A modelagem do número de pessoas que podem estar em uma zona de perigo pode ser definida como um processo de Poisson.

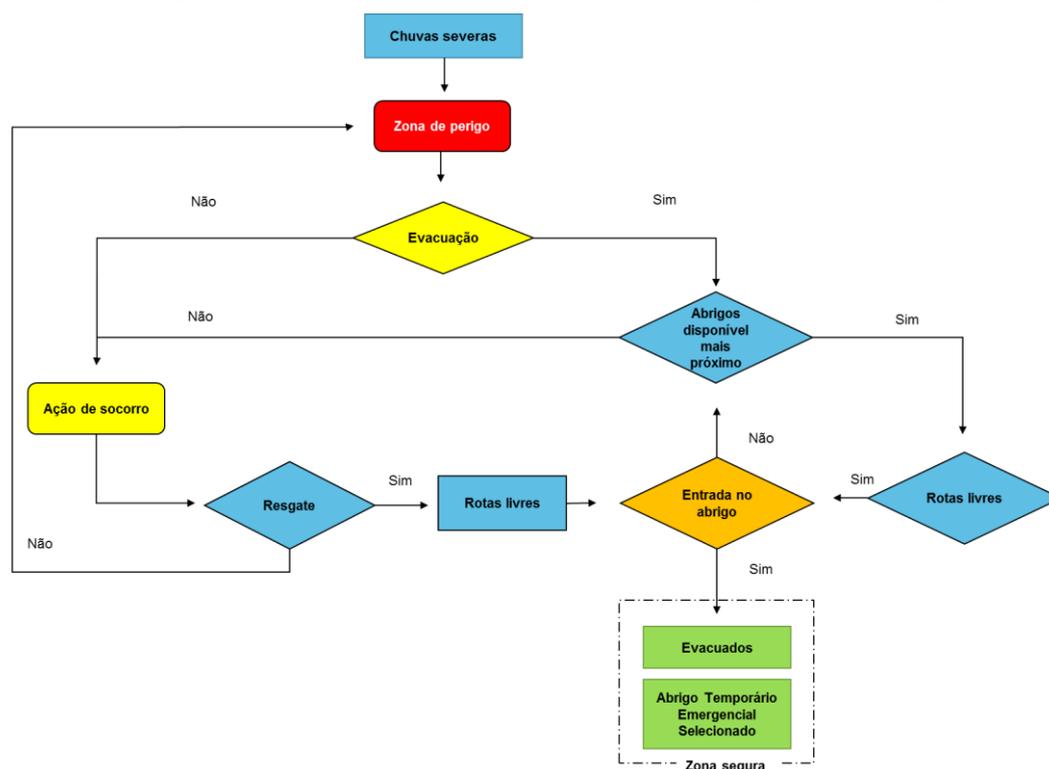
$$P(V_h | \theta a_i) = \frac{(\lambda_{hi})^{V_h}}{V_h!} e^{-\lambda_{hi}} \quad (4.1)$$

V_h é o número de pessoas desabrigadas na rota de evacuação em função da inundação e λ_{hi} é o número médio de pessoas desabrigadas por área, quando ocorre um cenário de chuva. Ao utilizar a distribuição de Poisson, os eventos devem ocorrer de forma 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 formato de sino conforme o valor de λ

aumenta (DOANE E SEWARD, 2014).

A partir da modelagem de teoria das filas, por meio das medidas de desempenho desse sistema (ver seção 2.1.4), informações serão obtidas para analisar as dimensões consideradas neste trabalho. Ou seja, será possível probabilisticamente simular o tráfego de pessoas até os abrigos, viabilidade das rotas e quais regiões estão livres do perigo, apresentando-se como potenciais localizações selecionadas para abrigar os afetados, conforme detalhado, no diagrama 2, a seguir.

Diagrama 2 – Framework do modelo de decisão de gestão de emergência



Fonte: O Autor (2021)

Para a análise das consequências, são utilizados elementos da teoria de decisão. “ θ ” é definido como o estado da natureza, expressando a incerteza associada ao problema. “ A ” representa o conjunto de todas as ações possíveis consideradas, sendo as consequências representadas por “ c ”. Uma abordagem probabilística é utilizada para tratar as incertezas associadas em “ A ”, através da distribuição de probabilidade sobre as consequências determinísticas.

De acordo com Berger (1985), “ $U(\theta, a_i)$ ”, é a utilidade quando o cenário “ θ ” e a ação “ a_i ” são consideradas. A utilidade, então, é calculada pela combinação da probabilidade das consequências “ c ” em “ A ” (chamada de função consequência $P(c|\theta, a_i)$). Conforme Keeney e Raiffa (1976), os valores das funções utilidade são definidos num intervalo de escala entre [0,1] em que “0” significa a pior consequência e “1” a melhor consequência. A função utilidade destas consequências é apresentada pela equação (4.2) para casos discretos:

$$U(\theta, a_i) = \sum_c P(c|\theta, a_i) U(c) \quad (4.2)$$

E para casos contínuos é representada pela equação (4.3):

$$U(\theta, a_i) = \int P(c|\theta, a_i) U(c) dc \quad (4.3)$$

4.2.4 Função utilidade e função probabilidade das consequências

Keeney e Raiffa (1976) propõem algumas etapas para o processo de avaliação da função utilidade multiatributo:

1. Preparar o decisor para avaliação (através da introdução das terminologias e ideias);
2. Identificar as hipóteses de independência;
3. Avaliar a função utilidade condicional;
4. Avaliar as constantes de escala;
5. Verificar a consistência.

Através deste procedimento de elicitacão muito bem estruturado, pode-se obter as constantes de escala para agregacão das funções de utilidade dos critérios. Nesse sentido, o procedimento de elicitacão da função utilidade se deu, inicialmente, num intervalo de escala entre [0,1] onde “0” significa a pior consequência e “1” a melhor consequência para os atributos da dimensão de viabilidade das rota (V_h), dimensão de capacidade do abrigo (C_p), dimensão do número de evacuados (L_h) e a dimensão econômica (E_f), de modo a avaliar os valores das utilidades com as consequências estimadas.

Segundo Keeney (1992), o que se deseja obter com esse modelo é uma função utilidade "U" de um indivíduo ou um grupo de indivíduos cujos valores são de interesse. A abordagem consiste em dividir o "U" em partes, trabalhar com essas partes e, logo após, agregá-las.

Na avaliação intracritério, ao subdividir a avaliação de "U" em partes, as curvas retratam as preferências do decisor com relação às dimensões de consequências consideradas no modelo (funções utilidade unidimensionais). Os ajustes das curvas levam em conta o comportamento do decisor em relação ao risco, que, por sua vez, é incorporado em cada "U" pela natureza da função utilidade. Logo, o decisor pode se apresentar propenso, avesso ou neutro ao risco para uma determinada situação em cada uma das dimensões analisadas. Tais hipóteses são mutuamente exclusivas e coletivamente

exaustivas quando aplicadas a qualquer loteria (KEENEY; RAIFFA, 1976).

Para definir o comportamento do decisor e sua estrutura de preferências em relação ao risco, o emprego de loterias é um procedimento amplamente utilizado. Por exemplo, avaliando-se o $U(V_h)$ do atributo de viabilidade da rota, de forma que $V_{h_0} \leq V_h \leq V_{h_1}$, onde V_{h_0} representa o menor valor dentro desse intervalo e V_{h_1} o maior valor.

Assim, se assume que o nível maior de V_h , isto é, com mais pessoas na rota, seja mais preferível, indicando que as pessoas nas zonas de perigos estão conseguindo se locomover até locais seguros.

O procedimento de avaliar a atitude em relação ao risco consiste, inicialmente, em atribuir uma loteria de 50% de chance de se obter a consequência V_{h_0} , 50% de chance de se obter V_{h_1} . Logo após, se comparam os dois extremos de V_h com a consequência esperada. As comparações são realizadas por várias perguntas ao decisor em relação as chances para V_{h_0} e V_{h_1} , e se ambas são, mais ou menos, preferíveis ou indiferentes a uma consequência certa.

As equações utilizadas neste modelo para o cálculo das funções utilidades unidimensionais, de forma a considerar as atitudes do decisor com relação ao risco são apresentadas a seguir:

$$u(x) = ax - \frac{1}{2}bx^2 \quad (4.4)$$

$$u(x) = ae^{-\frac{b}{x}} \quad (4.5)$$

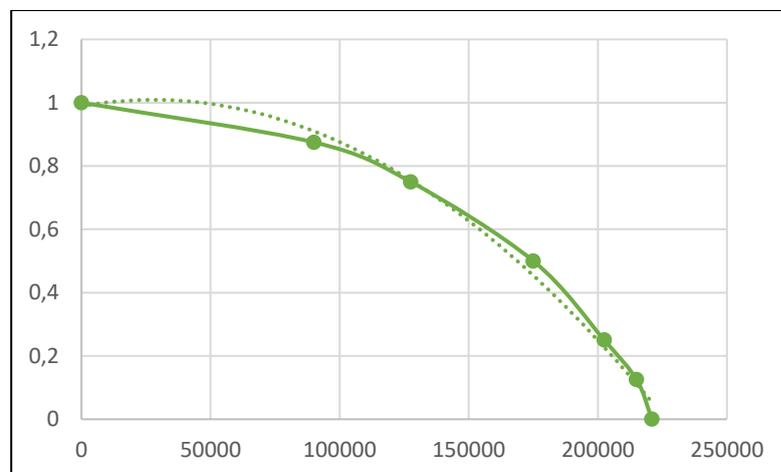
Denotadas, para cada atributo, em:

$$u(E_f) = a(E_f) - \frac{1}{2}b(E_f)^2 \quad (4.6)$$

$$u(x) = ae^{-\frac{b}{x}} \quad \forall x = V_h, C_p, L_h \quad (4.7)$$

A equação (4.6) representa a função de utilidade quadrática que pode ser definida como um polinômio de segundo grau. Um aspecto importante é que para $b > 0$, esta função é estritamente côncava, o que caracteriza um perfil averso ao risco, como se pode analisar na equação do gráfico 8., considerada ideal para o ajuste da dimensão econômica (E_f).

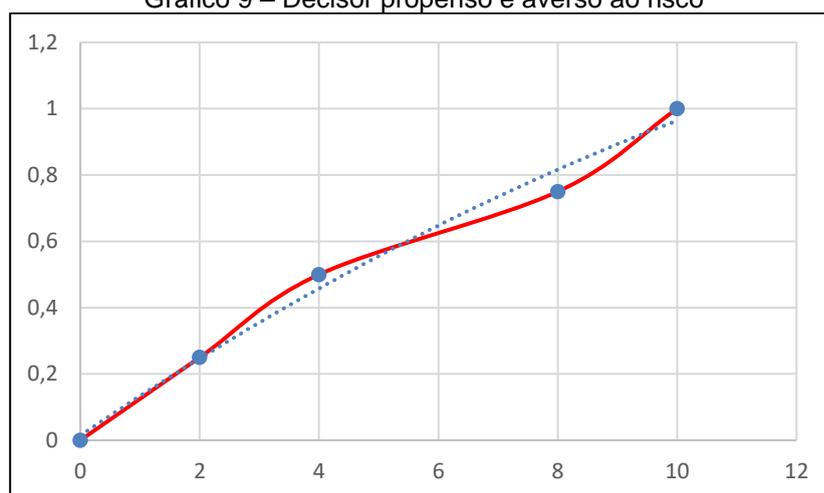
Gráfico 8 - Função unidimensional do decisor averso ao risco



Fonte: O Autor (2021)

Já a equação (4.7) representada pela função de utilidade logística (gráfico 4.2) apresenta uma situação de aversão a risco para valores maiores de x e propenso a risco para valores mais baixos de x . Nas avaliações efetuadas, esta última função se ajustou melhor aos demais dimensões de viabilidade das rota (V_f), capacidade do abrigo (C_ρ) e número de evacuados (L_f).

Gráfico 9 – Decisor propenso e averso ao risco



Fonte: O Autor (2021)

Na avaliação intercritério, são definidas as funções consequência, necessárias para o tratamento da incerteza associada ao cenário não controlado. Dessa forma, uma avaliação probabilística das consequências é necessária, na qual se determinam as funções de probabilidade da consequência, ou seja, determinar a probabilidade de se obter uma dada consequência dado que ocorreu um cenário de desastre de inundação.

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, onde as funções de probabilidade da consequência são obtidas, isto é, calcula-se a probabilidade de se obter uma dada consequência (c), dado que ocorreu um cenário (θ) em uma rota de evacuação (V_h) representado pela $P(c|\theta, V_h) = 1$.

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 utilidade e precisam determinar as probabilidades conjuntas das dimensões analisadas.

Neste estudo, avaliam-se as utilidades da escolha de abrigos para gestão emergencial causada pelos riscos dos eventos de inundações em áreas urbanas, considerando as consequências nas dimensões de impactos humana, econômica e operacional, de maneira probabilística e independente. Como exemplo, pode-se conjecturar as consequências advindas de um evento de chuvas severas em uma zona com grande ocupação de áreas ribeirinhas, que podem apresentar forte impacto social, haja vista que deixam pessoas desabrigadas, devido aos desastres geohidrológicos (inundações e deslizamento de terra). Além de um sistema de alerta a inundações, é necessário estar preparado para atender a população afetada, com abrigos e equipes de resgate pronto-socorro.

Portanto, os analistas e especialistas apoiam o decisor buscando estimar $P(c|\theta, a_i)$ com Funções de Distribuição de Probabilidade (FDP). A modelagem probabilística adiciona o aspecto da incerteza de forma coerente. A incerteza é inerente à tomada de decisão em ambientes propensos a riscos de desastres e, as FDP's, por sua vez, são estimativas representativas dessas probabilidades. Diante do exposto, foram obtidas as FDP's, com base nas análises estatísticas, escolhendo a função de acordo com o melhor ajuste do *p-value* obtido. Logo, para as dimensões de viabilidade de rota, econômica, capacidade e número de evacuados, as FDP's definidas são as seguintes:

- Função probabilística da Viabilidade de Rota ($P(V_h|\theta, a_n)$): A função de densidade de probabilidade lognormal foi utilizada para o cálculo da função consequência, sendo expressa por:

$$P(V_h|\theta, a_i) = \frac{1}{E_f \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln V_h - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \forall V_h > 0 \quad (4.10)$$

- Função probabilística da Capacidade ($P(C_p|\theta, a_n)$): A função de densidade de

probabilidade de Poisson foi utilizada para o cálculo da função consequência desta dimensão, sendo expressa por:

$$P(C_\rho|\theta, a_i) = \frac{(\lambda_{C_\rho})^{C_\rho}}{C_\rho!} e^{-C_\rho} \quad (4.9)$$

- Função probabilística do número de evacuados ($P(L_h|\theta, a_n)$): A função de densidade de probabilidade Gamma foi utilizada para o cálculo da função consequência, sendo expressa por:

$$P(L_h|\theta, a_i) = \frac{\beta^\alpha}{(\alpha - 1)!} L_h^{\alpha-1} e^{-\beta} \quad (4.11)$$

- Função probabilística da Dimensão de Econômica ($P(E_f|\theta, a_i)$): A função de densidade de probabilidade normal foi utilizada para o cálculo da função consequência econômica, sendo expressa por:

$$P(E_f|\theta, a_i) = \frac{1}{E_f \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma} \right)^2} \quad \forall E_f > 0 \quad (4.8)$$

Após a obtenção das probabilidades das consequências e as funções de utilidade de cada dimensão, a utilidade esperada pode ser calculada através da função:

$$U_{(c|\theta, a_i)} = \int P(E_f, V_h, C_\rho, L_h|\theta, a_n) u(V_h, C_\rho, L_h) dc \quad (4.12)$$

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.

A função utilidade multiatributo pode adquirir a forma de uma função aditiva (quando for verificada a independência aditiva nos atributos) ou a forma de uma função multilinear. Posto isto, a função utilidade aditiva pode ser representada pela Equação 4.13, que representa a independência das preferências do decisor com relação as dimensões consideradas:

$$U(E_h, V_h, C_\rho, L_h) = K_{V_h} U(V_h) + K_{C_\rho} U(C_\rho) + K_{L_h} U(L_h) + K_{E_f} U(E_f) \quad (4.13)$$

Onde $U(E_h, V_h, C_\rho, L_h)$ são as funções utilidades unidimensionais $[0,1]$ e os “K’s” são constantes de escalas que indicam o valor do *tradeoff*. Estas constantes são elicitadas pelos procedimentos de elicitacão baseados na comparacão de loterias (KEENEY e RAIFFA, 1976). O somatório dos “K’s” deve ser igual a 1 ($\sum K = 1$).

4.2.5 Ranking das alternativas

Devido a estrutura axiomática, a função utilidade multiatributo é aditiva, o que implica na independência de preferência aditiva do decisor entre os atributos, permitindo que as contribuições individuais dos critérios possam ser somadas (KEENEY e RAIFFA, 1976), conforme apresentado na equação a seguir:

$$U_{(c|\theta, a_i)} = \int P(E_f, V_H, C_\rho, L_H | \theta, a_n) u(E_f, V_H, C_\rho, L_H) dc \quad (4.14)$$

Essa formulação permitirá estimar a utilidade esperada global dentre as alternativas e, com isso, obter a ordenacão para indicar quais os abrigos deverão atender os afetados pelas inundações durante a ocorrência dos eventos extremos, indicando ao decisor quais os abrigos podem trazer a melhor eficiência de atendimento emergencial.

4.2.6 Aplicacão numérica e discussão preliminar dos resultados

Os desastres naturais constituem um tema cada vez mais evidente e debatido, vista a magnitude física e o tamanho de seu impacto na sociedade. Os danos causados por esses desastres podem ser não apenas de caráter ambiental, mas, também, social e econômico.

A aplicacão numérica do modelo de decisão multicritério é apresentada com o objetivo de estimar a utilidade esperada dos abrigos e ordená-las, a fim de sugerir as melhores alternativas. Este é um estudo hipotético, embora sejam utilizados dados realísticos, baseado em um cenário recorrente.

Dados do UNISDR (2015) apontam o Brasil como o único país das Américas que está entre os dez países com o maior número de afetados por desastres entre 1995 e 2015. Estimou-se que nesse período 51 milhões de brasileiros foram impactados por essas catástrofes. Em 2018, foram registradas 372 ocorrências confirmadas de desastres naturais de natureza hidrometeorológica (enchentes, enxurradas) e hidrogeologia (deslizamentos de terra), sendo 110 do tipo “alto” e “muito alto”, que levam a açã da Defesa Civil (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2018)

O anuário climatológico do INPE (2018) traz os estados de Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS) e Pernambuco (PE) com maiores índices de temperaturas acima da

Normal Climatológica, enquanto que na maior parte do centro-norte do país as chuvas ficaram abaixo da Normal Climatológica. No sul e sudeste, as chuvas ficaram acima da NC, com máxima no Rio Grande do Sul.

Conforme o relatório do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021) acerca dos danos sociais e econômicos decorrentes de desastres naturais em consequência de fenômenos meteorológicos no Brasil (2010– 2019). Dentre os dez grupos de desastres naturais, o maior número de óbitos, com 65% do total (1.131 casos), e feridos, com 48% (24.924 casos), teve como causa as enxurradas; em seguida, as inundações, com 11% (187 casos) e 17% (8.592 casos), respectivamente. Considerando todos os grupos de desastres, o total geral de óbitos foi de 1.734 casos e o de feridos foi 49.396 (ver figura 4.5)

:

Gráfico 10 - Proporção de óbitos e feridos por desastres naturais no período 2010- 2019

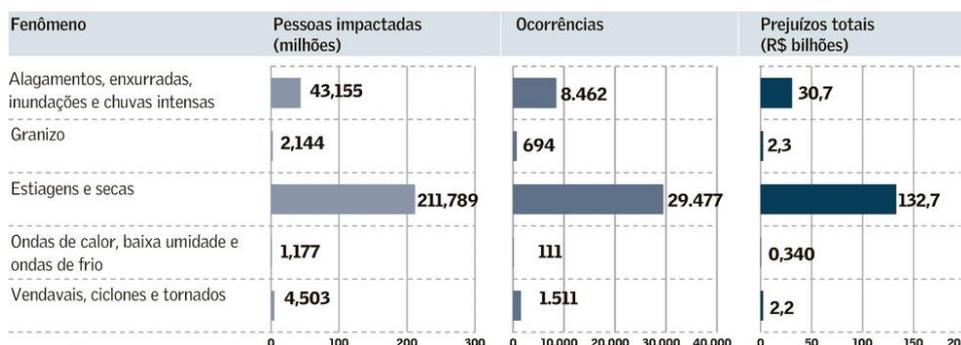


Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de INMET (2021)

Além de feridos e mortos, comumente, a ocorrência de desastres naturais no Brasil deixou grande parte dos afetados desalojados e desabrigados. O INMET (2021) ainda apresenta que, em decorrência das Inundações, houve um quantitativo de 1.417.718 desabrigados e 325.883 desalojados. Considerando todos os grupos de desastres, o total geral de desalojados foi de 14.042.579 casos e o de Desabrigados foi 702.487. Em resumo, o conjunto dos grupos de desastre alagamentos, enxurradas, inundações e chuvas intensas teve ao todo 8.462 ocorrências que implicaram 44.155.915 de vidas afetadas (ver figura 15).

Figura 15 – Prejuízos causados pelos impactos climáticos no Brasil



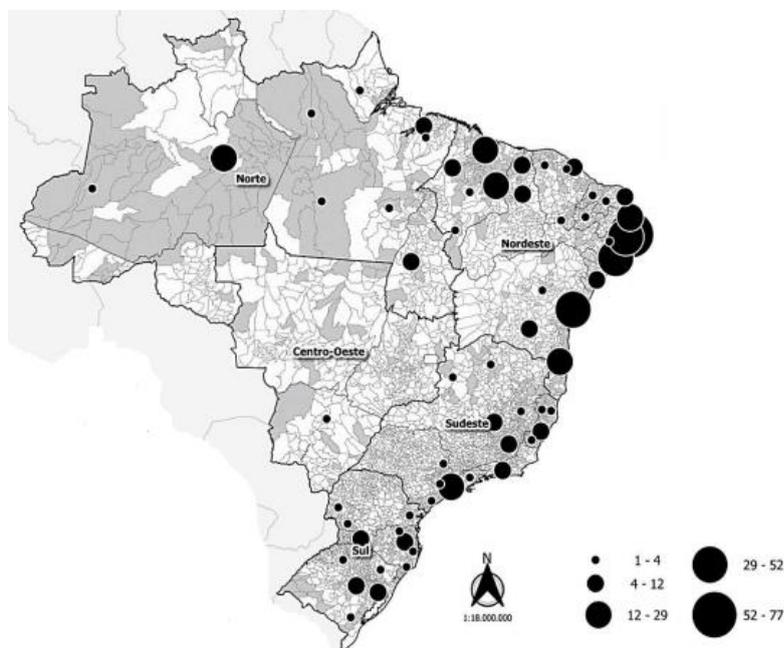
Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de INMET (2021)

As perdas econômicas dos quatro fenômenos hidrológicos foram sumarizadas em pouco mais de cerca de 31 bilhões em danos materiais e mais 30 bilhões em prejuízos totais, como é possível analisar não apenas estes, mas, também, os demais desastres que ocorrem no Brasil (INMET, 2020).

O nordeste brasileiro é uma das regiões com maiores ocorrências de desastres naturais. Segundo um recente relatório do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN (2020), a concentração dos alertas por região foi maior no Nordeste, que totalizou 401 alertas (70,5% do total), dos quais 224 foram para risco geológico e 177 para risco hidrológico (55,8% e 44,1%, respectivamente). Ao total, foram 19 mesorregiões impactadas, em 2020, em todo o Brasil, com destaque para a Região Nordeste, com 10 mesorregiões com registro de um ou mais municípios, seguido da Região Norte (4 mesorregiões), Região Sudeste (3 mesorregiões), Região Centro-Oeste e Região Sul (1 mesorregião cada). Em relação às tipificações de desastres reportadas no período, foram 21 eventos de chuvas intensas (60%), 9 eventos de inundações (26%), 4 eventos de enxurradas (11%) e, por fim, 1 evento associado a alagamentos (3%). (ver Mapa 2)

Mapa 2 – Monitoramento e alertas de desastres naturais no Brasil



Fonte: O Autor (2021)

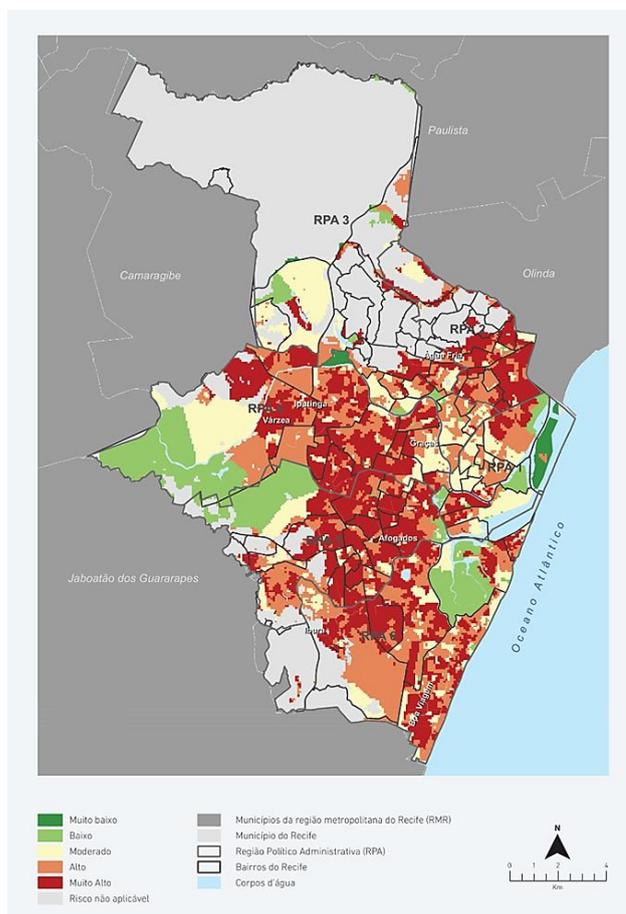
Nota: Adaptado de Cemade (2021)

O relatório de monitoramento do Cemade (2020) desataca o Agreste Pernambucano como a mesorregião que mais registrou desalojados: 4.718 habitantes, estimativa de R\$ 450 mil, referente aos danos relacionados às instalações públicas (comunitárias e prestadoras de serviços), totalizando 44.351 habitantes afetados pelos impactos causados por chuvas intensas (79,02 mm em 6 horas). Só no município de Caruaru, na data de 26/04/2020, 1.971 habitantes foram obrigados a desocuparem suas residências temporariamente de forma preventiva, especialmente nos bairros margeados pelo Riacho dos Mocós.

Outra região também afetada por enchentes em Pernambuco é a região metropolitana. No primeiro semestre de 2021, no mês de maio, o governo de Pernambuco contabilizou 2 mortes, 2 feridos e 1 pessoa desaparecida, além de 102 pessoas desabrigadas e 36 desalojadas devido às fortes chuvas que atingem a Região Metropolitana do Recife e a Zona da Mata do estado. A Secretaria Executiva de Defesa Civil (Codecipe) também registrou 82 deslizamentos de barreiras em nove municípios, além de 180 chamados, sendo 87 pedidos de colocação de lonas e 93 pedidos de vistorias (G1, 2021)

Na cidade de Recife, os altos valores de risco e a propensão a ocorrência de inundações se dá devido aos rios, áreas na região central do município ao longo do rio Capibaribe, Beberibe e afluentes (SEDEC,2019). Esses dados são monitoradas pela APAC e pela Defesa Civil, devido aos risco de inundação causados pelas chuvas fortes, e, de acordo com a APAC (2021), a precipitação no dia chegou a ser mais de 60% do que o previsto para o mês todo, o que ocasionou diversos danos e transtornos para toda a população. (Mapa 3)

Mapa 3 - Mapa de Risco de inundações de Recife



Fonte: SEDEC (2019)

Após a ocorrência de um desastre, a prioridade se concentra na localização de vítimas, prestação de cuidados médicos para as pessoas lesionadas, fornecimento de água, comida e abrigo aos sobreviventes. Essas tarefas, segundo Kunz, Reiner e Gold (2013), requerem atividades logísticas complexas.

De acordo com De Brito e Evers (2016), em uma revisão sistemática da literatura, há poucos trabalhos que usaram o MCDM como uma ferramenta de apoio à decisão no controle de inundações e emergências em problemas de gestão. Isso se deve, provavelmente, ao fato de que a gestão de emergências é uma tarefa complexa que requer coordenação e comunicação eficazes entre as equipes envolvidas, bem como informações confiáveis em relação à situação atual de emergência. A gestão de emergência trata da organização, gestão de recursos e definição de responsabilidades para abordar todos os aspectos das emergências, em particular, as etapas de preparação e resposta à ocorrência de eventos (UNISDR, 2009) (ver tabela 4).

Tabela 4 –Tipos de problemas abordados quanto ao gerenciamento de riscos de inundações.

Áreas de aplicação	Número de trabalhos
Ranking de alternativas para mitigação de inundações	41
Avaliação de risco	38
Avaliação da vulnerabilidade	27

Avaliação de perigo	27
Avaliação de suscetibilidade	21
Capacidade de Enfrentamento	11
Gerenciamento de emergência	8
Controle de inundação de reservatórios	7

Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de De Brito e Evers (2016)

Quando um desastre ocorre, são demandadas diferentes operações de socorro e suprimento de recursos para pessoas e áreas afetadas. Nos primeiros estágios de uma emergência, alguns itens são considerados especialmente necessários como, por exemplo, abrigos temporários, medicamentos, kits de higiene, alimentação básica e agasalhos. Assim, a localização de instalações adquire importância para a distribuição de suprimentos e serviços críticos sob condições de incerteza.

A complexidade dessas operações deve estar bem detalhada em um plano de emergência com uma população bem treinada e informada a respeito das rotas de evacuação, locais de abrigos e demais agentes públicos de pronto-socorro. Em 2020, o Ministério Público de Pernambuco (MPPE) recomendou aos municípios pernambucanos que apresentassem um plano de contingência e prevenção de acidentes que possam ocorrer por chuvas fortes, enchentes, transposição de barragens e inundações (DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2020)

Ainda segundo o Diário de Pernambuco (2020), os municípios devem apresentar o plano de contingência, indicando como será o manejo de recursos ante eventual situação de crise ou emergência; informar se o plano foi apresentado à Defesa Civil do Estado, indicando quem será e se já está devidamente designado o coordenador de Defesa Civil do Município, bem como sua lotação; e alertar ao MPPE, ainda, se há representantes do município frequentando as oficinas de capacitação promovidas pela Defesa Civil, além do mapa das áreas de risco de cada território. As cidades devem, também, informar se já destinaram pontos ou locais de abrigo, caso sejam necessários, em situações de desastres, indicando a adoção das medidas preconizadas pela Lei federal n.º 12.608/12:

“Art. 1º Esta Lei institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC, autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres e dá outras providências.” (Lei federal n.º 12.608/12)

A lei supracitada ressalta, em seu artigo 2º, o dever dos órgãos públicas de adotar medidas de redução de riscos de desastres, em cooperação com entidade privadas e demais órgãos técnicos-científicos da sociedade civil, do mesmo modo de o cenário de incertezas não constituirá óbice para tal.

Inicialmente, como em todos os modelos de decisão, é necessário identificar quem é o decisor. Neste caso, pode-se considerar o decisor como um gestor público, como um responsável pela defesa civil ou quaisquer outras ações comunitárias. Então, os resultados obtidos devem refletir suas preferências. A posteriori, presume-se que a estrutura de preferência do decisor deve refletir 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.

A estrutura de preferências do decisor será traduzida em um ranking de utilidades esperadas de cada um dos abrigos analisados. O decisor deve verificar as consequências/utilidades de cada um deles, a fim de saber quantos e quais precisarão ser ativados e utilizados como abrigos emergenciais. De maneira geral, um mesmo abrigo pode apresentar utilidades diferentes de acordo com cada dimensão analisada. Assim sendo, a estruturação sólida e consistente do modelo MCDM baseado em utilidade, para a seleção e localização de abrigos temporários, possui finalidade de facilitar o trabalho de decisores em uma situação emergencial.

Para a aplicação do modelo foi considerado o município de Recife, por ser uma área urbana com alta densidade populacional, com altos riscos de inundações, além de ter um histórico expressivo de perdas e danos causadas por evento de desastres geohidrológicos em Pernambuco.

A partir do levantamento de informações no site oficial da Defesa Civil da prefeitura de Recife, verificou-se a existência de apenas 1 abrigo com capacidade para 180 pessoas, localizada na travessa São Gusmão, alcunhado de abrigo São José. Assim, foram mapeadas algumas escolas na região próximas ao abrigo disponibilizado pela prefeitura. Por meio de metadados georreferenciados da secretária da educação do município, disponibilizados no site Dados Recife (2021), foram selecionadas e mapeadas 10 escolas/alternativas para aplicação do modelo, considerando a proximidade com o abrigo já estruturado pela secretaria de defesa civil e das regiões com alto risco de ocorrer inundação, visto que os abrigos precisam atender aos residentes com probabilidade de serem afetados. Com essas informações, relativas à capacidade e localização, as alternativas definidas foram (ver tabela 5):

Tabela 5 – Potenciais alternativas de abrigos

Alternativa	Abrigos	Capacidade total
A1	Abrigo São José	180
A2	E.M Prof. José da Costa Porto	403
A3	E.M do Coque	580
A4	E.M Prof. Professor Josué de Castro	299
A5	EM Almirante Soares Dutra	398
A6	EM Colégio Reitor João Alfredo	1050

A7	EM Mércia de Albuquerque Ferreira	345
A8	E.M Dos Remédios	428
A9	E.M Edite Braga	383
A10	E.M Engenheiro Umberto Gondim	769

Fonte: O Autor (2021)

O estudo utilizou-se de ferramentas computacionais, tais como: o software Excel e Rstudio, para realizar as simulações com as quatro dimensões de consequências consideradas, que são as dimensões Econômica (E_f), de viabilidade das rota (V_h), capacidade do abrigo (C_p) e número de evacuados (L_h)

Para este estudo, a priori, somente um cenário de desastre foi considerado, devido ao fato de que apenas chuvas extremas causam catástrofes de inundações, apesar da probabilidade baixa de ocorrência e alta magnitude. Então, considerou-se um cenário de chuvas severas, ocorrendo entre 12-18 horas, causando desastres geohidrológicos, isto é, enchentes e inundações, deixando residentes desabrigados e desalojados. Como consequência, tem-se um cenário em que será necessário dispender esforços gerenciais das operações de emergências, os quais devem estar, previamente, bem detalhados e documentados pelos gestores.

Estimar analiticamente o evento de inundação e seus desdobramentos de enfrentamento é uma tarefa árdua, pois é um cenário que abrange vários parâmetros e subsistemas complexos. No entanto, no presente estudo, para estimar os pedidos de socorro, de maneira simplista, uma evacuação, é utilizado o modelo de filas, que combina as principais características, principalmente probabilísticas, que influenciam a chegada de um pedestre até um sistema, neste caso, o abrigo. Essa abordagem pode ser evidenciada em estudos como o de Van Woensel e Vandaele (2007) e Chen et al (2021).

Para estimar as consequências para a dimensão de impacto sobre os distúrbios nas rotas por desastres há a suposição sobre a taxa de chegada de pedestres (λ) nos abrigos e o tempo de serviço. Dessa maneira, o atendimento aos afetados (μ) é constante, existindo apenas um atendente/abrigo $s = 1$, de tal modo que se possa modelar o número de evacuados nas rotas de evacuação em direção aos sistemas (abrigos) pela teoria das filas do tipo D/D/1.

Os valores de taxa de chegada e capacidade para cada faixa de veículos adotados são mostrados na Tabela 6:

Tabela 6 – Características da evacuação até os abrigos

Alternativa	λ (Chegada de Residentes/h)	μ (Taxa de Atendimento/h)
A1	18	22
A2	60	66
A3	80	88

A4	0	0
A5	50	54
A6	150	163
A7	50	52
A8	60	64
A9	0	0
A10	110	126

Fonte: O Autor (2021)

Dessa forma, os resultados das medidas de desempenho dos sistemas de filas serviram para estimar as dimensões de número médio de residentes na rota de evacuação (V_h), dado por L_q , número de evacuados (L_h) dado pelo L , e capacidade do abrigo (C_p) dada pela análise de utilização do sistema, isto é, pelo ρ . As simulações de filas foram realizadas com os valores de taxa de chegada e atendimento para cada abrigo (tabela 7). O mecanismo de Viabilidade das rotas para indicar se o abrigo é uma boa alternativa é dado pela análise semelhante ao do mecanismo de formação de trânsito.

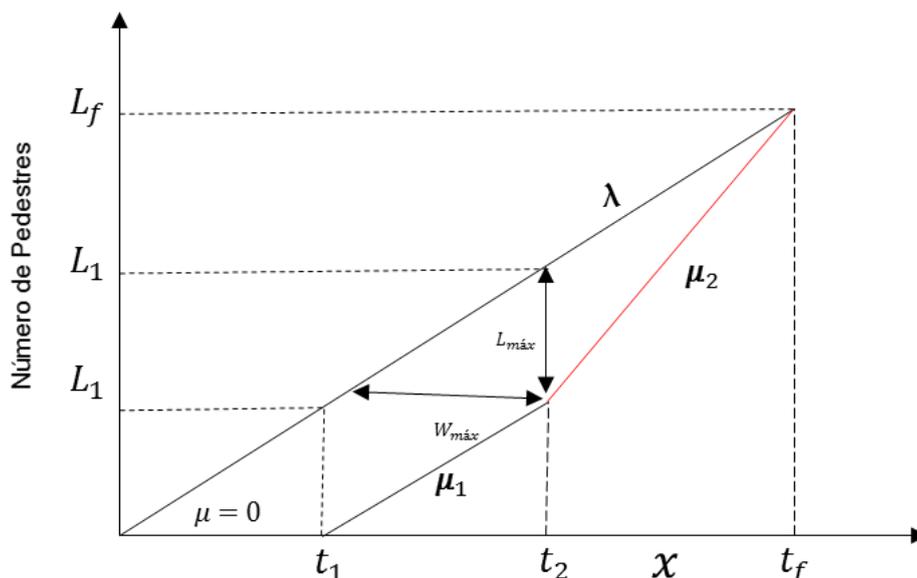
Tabela 7 – Desempenho dos abrigos

Alternativa	L_q (número médio de residentes na rota de evacuação)	L (número médio de residentes no abrigo)	ρ (utilização do abrigo)
A1	4	5	0,8182
A2	9	10	0,9091
A3	9	10	0,9091
A4	-	-	-
A5	12	13	0,9259
A6	11	12	0,9202
A7	24	25	0,9615
A8	14	15	0,9375
A9	-	-	-
A10	6	7	0,87302

Fonte: O Autor (2021)

Considera-se que no instante da ocorrência do desastre ($t_0 = 0$) a via de trânsito torna-se completamente bloqueada. Passado algum tempo (t_1 horas) da ocorrência da inundação, as faixas não afetadas pela inundação são liberadas, e somente t_2 horas depois de ocorrido da inundação, libera-se completamente a via para o tráfego de pedestre, conforme representado em (4.9).

Gráfico 11 – Mecanismo de liberação das rotas de evacuação



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de Setti (2002) e Fogliatti (2007)

4.2.6.1 Abrigos emergenciais temporários

Apesar da capacidade de monitoramento dos sistemas de alerta e gestão da emergência, o número de pessoas afetadas, sejam desabrigadas ou desalojadas, é um dos problemas mais latentes, o qual os gestores precisam enfrentar para garantir abrigos temporários emergenciais - ATE (UNICEF, 2008). A UNICEF (2008) usa o conceito “abrigo temporário” como sendo:

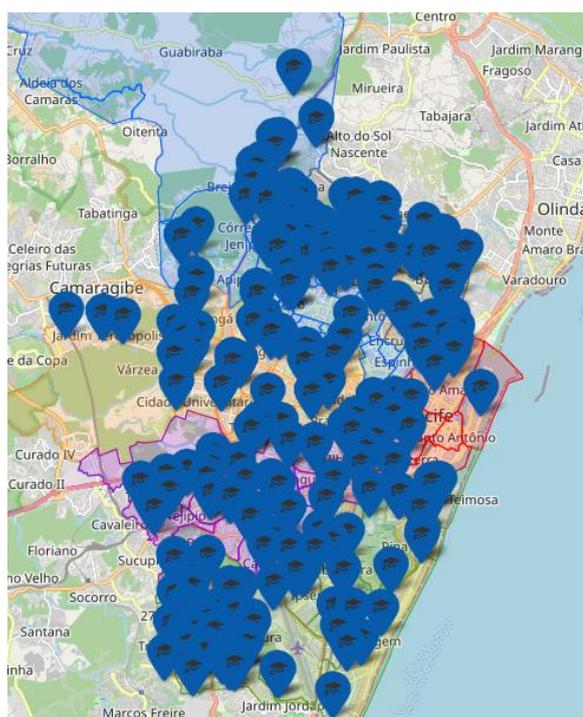
“...um lugar onde se proporciona temporariamente teto, alimentação, roupa, água potável, saúde e proteção; onde a estadia será curta ou média, até que se possa retornar ao lar ou a um lugar seguro de maneira permanente; e onde a comunidade abrigada desempenha um papel importante na sua gestão, conjuntamente com as autoridades locais ou responsáveis designados.” (UNICEF, 2008)

O abrigo pode ser definido como um edifício viabilizado para prover alojamento temporal para pessoas que não podem continuar vivendo em suas unidades familiares (UNICEF, 2008), ou, ainda, como um lugar físico destinado a prestar asilo, amparo, alojamento e resguardo para pessoas diante da ameaça, iminência ou ocorrência de um fenômeno destrutivo. Os edifícios e espaços públicos são comumente utilizados com a finalidade de oferecer os serviços de abrigo em casos de desastre (CÍCERO, 1995 *apud* UNICEF, 2008)

Um desastre que gera desabrigados tem o potencial de desestabilizar a vida comunitária e a vida familiar (VALÊNCIO, 2009). A utilização de escolas como abrigos temporários é bastante frequente em países da América Latina e do Caribe (UNIDRSS, 2020). Os esforços e iniciativas para a não utilização da infraestrutura escolar em casos de emergência, ou ao menos o preparo necessário se isto ocorrer, constituem um tema de

debate frequente, especialmente quando a população necessita de segurança, abrigo e proteção em momentos críticos (UNICEF, 2008). Nesse sentido, as escolas podem configurar construções seguras, com localização adequada e protegida. Segundo a UNICEF (2008), é importante que as escolas contem com planos escolares de emergência. Portanto, o presente estudo, utiliza as escolas da rede municipal de Recife (ver fig. 4.10) para aplicar o estudo de caso e validação do modelo proposto para localização e alocação de recursos em situações de desastres extremos.

Mapa 4 – Rede municipal de escolas em Recife



Fonte: Prefeitura de Recife (2021)

Dentre os mais diferentes tipos de projetos de abrigos, o projeto que se enquadrava na proposta de abrigos emergenciais temporários em escolas foi o proposto por Moraes (2017), baseado no Paper Log House, criado por Shigeru Ban (ver fotografia 1). O projeto possui materiais, processo de montagem e desmontagem simples e de fácil execução, o que, dentre os pesquisados na literatura, é o que mais ofereceu praticidade operacional e menor custo.

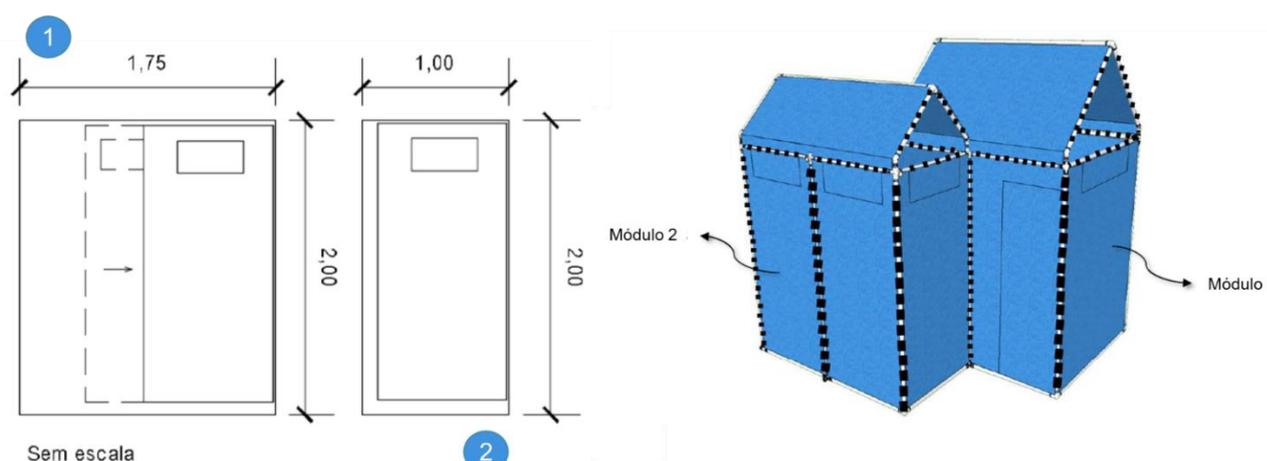
Fotografia 1 - Abrigo Paper Log House



Fonte: Sakuma,1995 *apud* Moraes (2017).

O Abrigo Temporário Emergencial - ATE proposto por Moraes (2017) é modular, representado protótipo final (ver figura 15) de 3,5m² (para até 3 pessoas), com 2m² para cada módulo anexado (mais duas pessoas).

Figura 15 – Layout final do abrigo

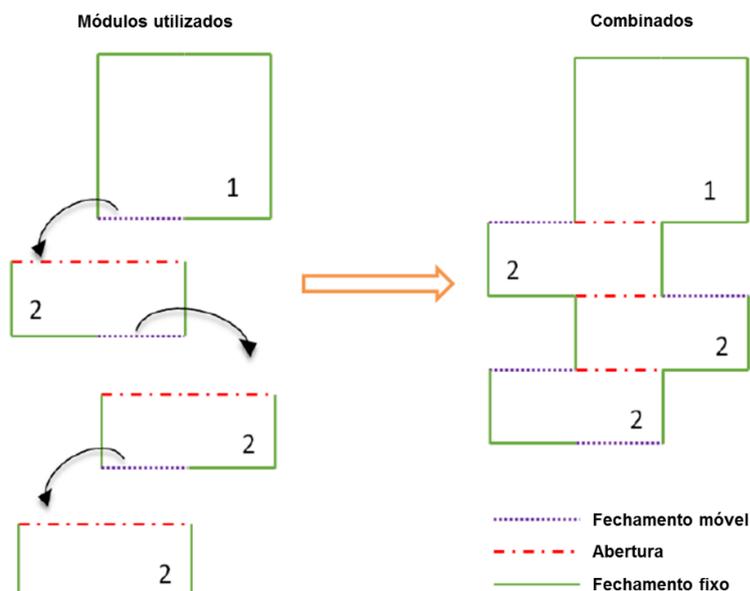


Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Moraes (2017)

A característica de ser modular torna os abrigos temporários padronizados, porém adaptáveis ao número de ocupantes, haja vista que cada família atingida possui uma composição diferente (ver figura 16)

Figura 16 – Simulação de layout.



Fonte: O Autor (2021)

Nota: adaptado de Moraes (2017)

Ao analisar os custos, a autora propõe o orçamento de R\$ 1.537,24 para o módulo 1 e 1.044,60 para o módulo 2, com base no valor médio do mercado nacional (ver tabela 4.5). Moraes (2017) explica que a mão-de-obra não foi quantificada devido as condições encontradas em desastres naturais. A mão-de-obra é realizada pela defesa civil, bombeiros e voluntários.

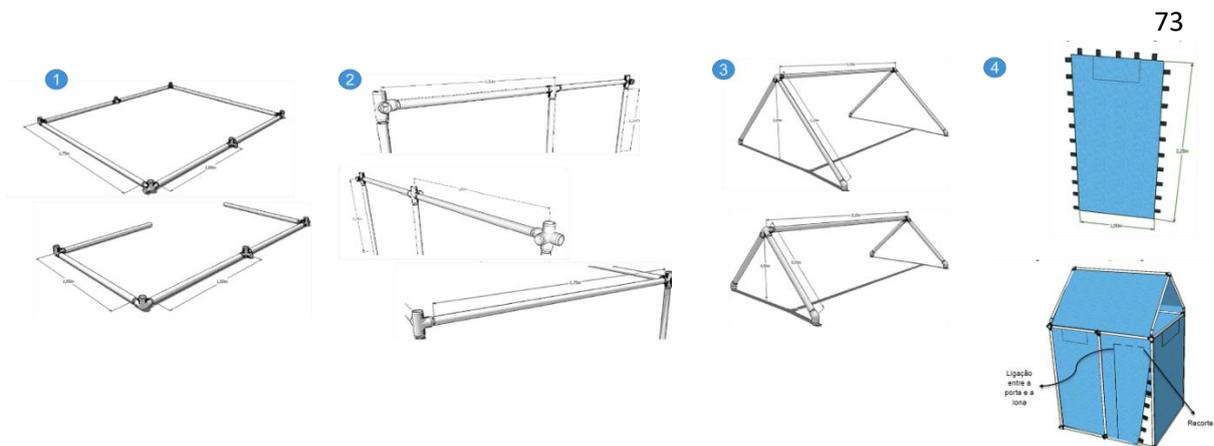
Tabela 8 – orçamento unitário de cada módulo

Peças	Módulo 1		Módulo 2	
	Quantidade	Preço	Quantidade	Preço
Tubo	36 m	R\$756,00	27 m	R\$567,00
Tê (lateral)	5 uni	R\$47,00	4 uni	R\$38,20
Tê	2 uni	R\$34,00	-	-
Cruzeta modificada	5 uni	R\$47,75	4 uni	R\$38,20
Conexão 5 entradas	2 uni	R\$29,03	2 uni	R\$29,03
Joelho 45°	4 uni	R\$48,08	4 uni	R\$49,60
Nípel	4 uni	R\$24,80	4 uni	R\$24,80
Plug	2 uni	R\$4,00	2 uni	R\$4,00
Lona (azul)	25,6 m ²	R\$207,36	14,1 m ²	R\$105,84
Lona (transparente)	3,5 m ²	R\$26,27	2 m ²	R\$3,20
Velcro	16,2 m	R\$151,47	11,2 m ²	R\$104,72
Palletes	4 uni	R\$160,00	2 uni	R\$80,00
Total		R\$1.537,24		R\$1.044,60

Fonte: Moraes (2017)

A montagem é descrita na figura 17, cuja mesma deve feita através do encaixe das peças de tubos e conexões, na base de palletes e, por fim, a cobertura. Moraes (2017) estima uma demora em torno de 10 horas para ser montado por 20 pessoas. No entanto, esse tempo pode ser otimizado com treinamentos e capacitações.

Figura 17 – montagem dos módulos



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Moraes (2017)

Conforme os autores Saadatseresht, Mansourian e Taleai (2009), um dos grandes desafios no desenvolvimento e execução de um plano de emergência está na distribuição das pessoas entre as zonas seguras, ou seja, para os lugares que as pessoas devem ir e como chegarão a esse destino. Nesse sentido, a evacuação de pessoas em situações de emergência tem o propósito de removê-las de um lugar perigoso e levá-las para um lugar mais seguro, a fim de reduzir a vulnerabilidade de saúde e segurança dos afetados, cuja movimentação deve ter a maior rapidez e precisão possível. Por isso, vê-se a importância da elaboração de planos de gestão de emergência que tenham em seu escopo um plano de evacuação capaz de proporcionar as respostas mais adequadas em casos de eventos extremos.

Diante disso, um dos primeiros passos para o desenvolvimento do plano de evacuação consiste na determinação das zonas seguras. Subsequentemente, faz-se necessário definir para onde deve ir cada evacuado e por qual rota. Para que um plano possa ser considerado adequado, é necessário, ainda, considerar a capacidade máxima das zonas seguras que foram selecionadas e verificar qual a distância a ser percorrida até elas. Em outras palavras, em um plano de evacuação, a distribuição dos evacuados entre as zonas seguras deve estar baseada na capacidade máxima dessas zonas e na distância de cada pessoa atingida até o seu destino mais próximo (SAADATSERESHT; MANSOURIAN; TALEAI, 2009).

Nesse sentido, os autores apontam três etapas para a planificação de evacuação:

1. selecionar locais seguros e adequados para a evacuação;
2. aplicar restrições (como distâncias) e selecionar zonas seguras para cada conjunto de edificações e, em seguida, para cada conjunto encontrar as rotas ótimas;
3. considerar as distâncias das zonas seguras e a otimização dos fatores distância, capacidade das zonas seguras e população e determinar uma distribuição ótima das pessoas até as zonas seguras.

Essas zonas seguras, isto é, os abrigos emergenciais, não apenas nortearão os indivíduos como irem a locais seguros em eventos extremos, mas, também, auxiliará os agentes públicos a executar as ações de socorro e suprimento de recursos necessários de garantia de sobrevivência e segurança dos afetados.

A gestão de desastres naturais deve considerar diferentes abordagens e objetivos. Por ser uma importante tarefa, o processo de tomada de decisão necessita do apoio de métodos sistemáticos de decisão, com atributos que abranjam as dimensões de aspectos sociais, ambientais e econômicos. Diante de problemas de decisão com objetivos que requerem uma visão global e abrangente, os métodos multicritérios podem ser de grande eficácia na gestão de desastres, visto que incorporam fatores qualitativos e quantitativos. (NAPPI e SOUZA, 2015).

Portanto, a dimensão econômica é calculada com base capacidade total de cada abrigo dividido pela capacidade de pessoas que cada cabine comporta, multiplicado pelo orçamento de construção de cada módulo, segundo a função (4.15):

$$Ef = \left(\frac{\text{Capacidade Total do Abrigo}}{\text{capacidade do módulo}} \right) \text{Custo unitário do módulo} \quad (4.15)$$

Inicialmente, como se trata de um modelo de apoio, a construção de um plano de evacuação e de preparação para o desastre considerou a capacidade total. O caráter determinístico desse critério será tratado a partir da elicitação da função consequência e sua modelagem probabilística (tabela 9).

Tabela 9 – Custo de estruturação de cada alternativa em Abrigo emergencial temporário

Alternativa	Custo
A1	-
A2	R\$ 208.076,96
A3	R\$299.465,60
A4	R\$ 154.379,68
A5	R\$205.495,36
A6	R\$542.136,00
A7	R\$178.130,40
A8	R\$220.984,96
A9	R\$197.750,56
A10	R\$397.050,08

Fonte: O Autor (2021)

A elicitação da função utilidade ocorre sobre um intervalo fechado de consequências, avaliando as piores e melhores consequências em relação à dimensão financeira, onde o valor máximo considera a pior consequência (alto custo) e o valor mínimo, a melhor

consequência.

As demais soluções são consideradas com o objetivo de maximização, partindo do pressuposto que se o sistema que está sendo utilizado indica que as pessoas foram abrigadas e estão em segurança. Vale ressaltar que, embora se possa ter valores discretos e enumeráveis (número de pessoas evacuadas e na rota) na consequência humana, os conjuntos das consequências nas quatro dimensões podem ser considerados contínuos para fins da estimação da função utilidade. O decisor tem um comportamento de aversão ao risco na dimensão econômica, viabilidade de rota e número de evacuados, e neutro, em relação à dimensão de capacidade.

Para determinar os parâmetros de ajuste das funções utilidades unidimensionais, foi realizado o uso de loterias ou pelo ajuste das funções utilidades computacionalmente. Ademais, as constantes de escalas (k_{E_f} , k_{V_h} , k_{C_p} , k_{L_h}) foram elicitadas, utilizando a matriz de consequência e o método de trade-off (KEENEY & RAIFFA, 1976). Os valores das constantes de escala consideradas foram $k_{E_f} = 0,160831$, $k_{V_h} = 0,2413442$, $k_{C_p} = 0,17604133$, $k_{L_h} = 0,421783$, respectivamente, para as consequências econômica, viabilidade de rotas, capacidade e evacuados.

Por meio da agregação aditiva (Keeney e Raiffa (1976)), as utilidades globais dos abrigos foram avaliadas e depois ordenadas (ranqueadas) de acordo com a estrutura de preferências estabelecida pelo decisor para que ele possa planejar ações futuras. A utilidade multiatributo (global) de cada alternativa a_i é apresentada na tabela 10. O Abrigo A1 é considerado como a melhor alternativa em termos de utilidade global. Suas medidas de desempenho refletem uma boa performance, ocupando, também, o primeiro lugar no que se refere à dimensão financeira e ao fator de utilização, tendo um desempenho elevado, em termos de utilidade unidimensional em 3 das 4 dimensões.

tabela 10 – Ordenação das Utilidades Globais das alternativas

Ordenação	Abrigo	U_{global}
1º	A1	0,1608351
2º	A9	0,1578891
3º	A4	0,1577343
4º	A5	0,1575417
5º	A7	0,1574169
6º	A10	0,1574095
7º	A8	0,1573894
8º	A2	0,1573497
9º	A6	0,1573283
10º	A3	0,1572630

Fonte: O Autor (2021)

A região em que estão as alternativas (abrigos) com melhores índices de utilidade esperada (A1, A9, A4, A5, A7) serão consideradas como a área de segurança, onde os residentes em evacuação, desalojados ou desabrigados podem ir em busca de proteção e segurança mediante a um desastre de inundação. Esta região será considerada para realizar as simulações, com objetivo de melhor analisar o comportamento dos agentes envolvidos durante a crise.

Neste cenário, 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 auxiliar na construção de um planejamento e preparação emergencial que suporte as respostas às consequências de desastre.

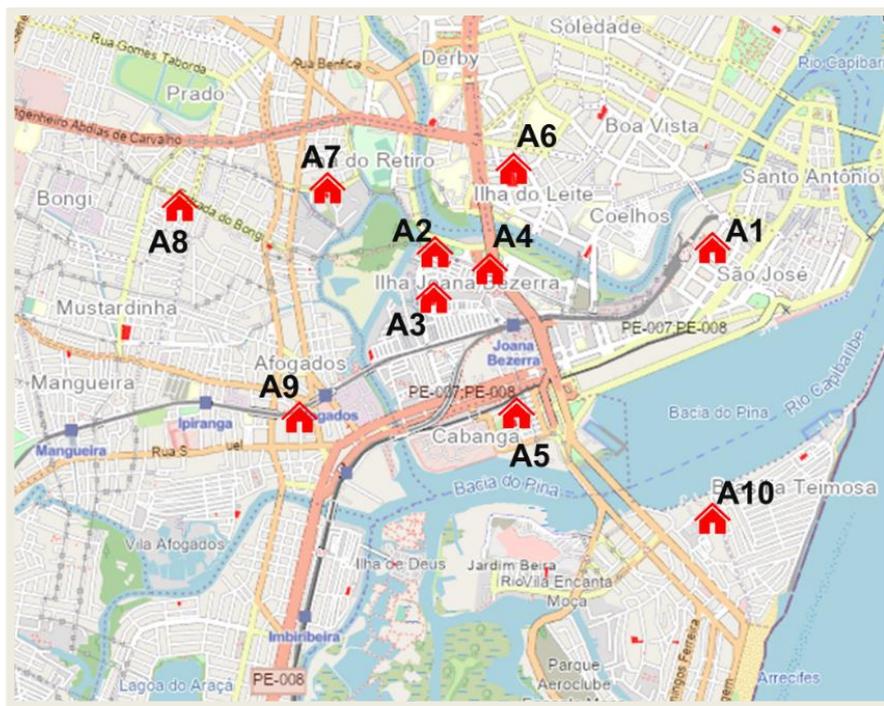
Portanto, nota-se a importância de considerar cada dimensão de consequência na geração da utilidade multidimensional, que forma um ordenamento em hierarquia de priorização no momento de escolher quais os locais podem representar potenciais abrigos temporários emergenciais. As análises servirão como input para o processo de gerenciamento de risco de inundações urbanas.

Desse modo, o modelo proposto utiliza a utilidade multidimensional, agregando não somente os custos de estruturação do abrigo, mas, também, suas medidas de desempenho em termos de operação e humana e de números de abrigados, beneficiando o decisor na tomada de decisão. Sob essa ótica, uma interpretação crítica dos resultados do modelo contribui para o gerenciamento emergencial 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

Na figura 18, a seguir, é possível analisar a distribuição espacial dos abrigos emergenciais temporários. Além do mais, para uma análise mais ampla, a ordenação dos melhores abrigos obtidos servirá de dados de entrada para o modelo de simulação baseada em agente para melhor compreensão do cenário.

Figura 18. – Distribuição espacial dos Abrigos Emergenciais Temporários



Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Open Street Map (2021)

A seguir, é apresentada uma simulação baseada em agente para entender as complexas interações durante o evento de inundação.

4.3 Modelagem baseada em agente de gestão emergencial de desastres.

Modelos baseados em agentes (MBA) são usados para simular sistemas complexos e heterogêneos, como infra-estruturas, e podem ser aplicados em uma vasta gama de conhecimentos (Cimellaro et al., 2018). Por isso, situações complexas, como inundações, que requerem planejamentos de contingência em grandes áreas, bem como o gerenciamento de atividades logísticas, são tarefas difíceis e complexas. A complexidade reside no fato de que um bom plano de evacuação, por exemplo, tem que levar em conta uma série de fatores concomitantes. Esses fatores incluem:

1. A natureza do desastre em questão;
2. A geografia única e a infraestrutura de transporte em uma determinada área;
4. Os padrões de comportamento humano previstos no processo de evacuação;
4. A distribuição da população na área;
5. A dinâmica populacional ao longo de diferentes períodos de tempo; e
6. As necessidades especiais de diferentes grupos populacionais.

Adicionalmente, para qualquer comunidade compreender completamente como esses fatores afetariam uns aos outros, seria necessário ao menos que a comunidade

tivesse experiência anterior de um desastre de inundação semelhante. Por isso, o modelo propõe uma simulação computacional da ocorrência de uma inundação, a evacuação dos residente e, por fim, considerando esse cenário extremo, é apresentado um modelo de simulação de ações humanitárias em assistência a população afetada, para que os decisores possam visualizar diferentes cenários *'What if'* (e se) e, então, usar os resultados dessas simulações para melhor gerenciar seus recursos e ações emergenciais.

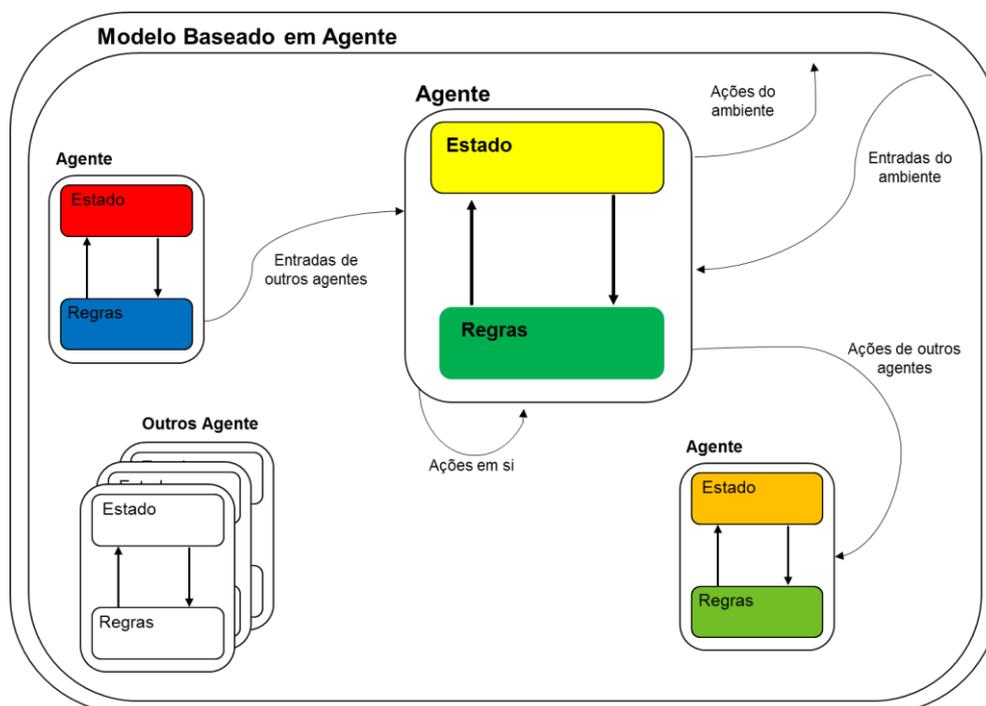
A estrutura do modelo de simulação baseada agente é constituída de um agente, que representa alguma entidade que completa uma ação ou toma uma decisão através das interações com seu ambiente. Um agente pode representar um pedestre em evacuação tomando decisões de rota de fuga de maneira autônoma, dentro de uma estrutura de estados de ações (ver figura 19). Da mesma forma, um agente também pode representar uma organização, como uma secretaria de defesa social de um governo decidindo sobre política de enfrentamento e resposta eventos extremos. O paradigma do agente se alinha ao conceito de sistemas compostos de múltiplas entidades sociais em interação e subsistemas técnicos.

Os conceitos baseados em agentes geralmente são o melhor meio para modelar problemas complexos desde que sejam satisfeitas as seguintes condições:

- O problema tem um caráter distribuído e, portanto, cada ator é, até certo ponto, autônomo;
- Os subsistemas (agentes) operam em um ambiente dinâmico;
- A interação dos subsistemas é caracterizada pela flexibilidade: ela pode resultar de uma atitude reativa ou proativa, a partir de uma propensão para cooperar ou competir, ou pode ser o resultado de uma interação social .

Essencialmente, o *framework* (ver figura 4.16) é formado por “objetos” diferentes que interagem com outros “objetos”. Todos esses objetos juntos compõem o sistema e, assim, em um sistema baseado em agentes modelo, é possível modelar esses “objetos” e suas interações, os quais podem ser tanto técnicos, tais como instalações de produção, veículos elétricos, gasodutos, ou, por outro lado, ações de entidades sociais, incluindo indivíduos, organizações ou partes delas.

De modo simplista, em qualquer modelo de simulação baseado em agente, precisa-se capturar o comportamento relevante e interações aplicáveis. Uma vez que isso tenha sido feito, é possível codificá-la em um modelo de simulação e determinar a condição de partida.



Fonte: O Autor (2021)

Nota: Adaptado de Van Dam et al. (2010)

Logo após, os agentes começam a interagir e a formar vínculos e, com isso, o sistema evolui. Além do comportamento e da interação, também é possível rastrear todos os tipos de características dos agentes e visualizá-los em respeito a cada agente ou componente do sistema, em relação a sua evolução global. .

A modelagem baseada em agentes é um tipo de técnica de modelagem de microsimulação, que aborda as características desagregadas das unidades constituintes em um sistema complexo e as interações dinâmicas entre essas entidades autônomas individuais. Como o tráfego é dinâmico e desagregado por natureza, a modelagem baseada em agentes é bem adequada para modelagem e simulação de sistemas de tráfego e transporte. Em contraste com a macrosimulação, a MBA tem vantagens em representar melhor situações realistas durante, neste cenário, as evacuações. Ela também proporciona maior flexibilidade e capacidade de avaliar diferentes cenários em situações de emergência.

A modelagem baseada em agentes pode auxiliar o decisor a entender melhor os resultados de diferentes opções no planejamento de evacuação e na gestão de desastres e obter insights sobre a dinâmica de uma evacuação que normalmente não pode ser alcançada através de abordagens tradicionais de modelagem macroscópica. Além disso, a capacidade de uma modelagem baseada em agentes a modelagem na captura dos detalhes dos movimentos de trânsito também pode ajudar a comunicar melhor com um público em geral sobre a complexidade de uma evacuação.

Apesar de a SBA ser amplamente utilizada para analisar os comportamentos das partes interessadas na implementação de políticas urbanas, especialmente nos eventos de

desastres naturais, isso se dá devido à dificuldade de criar um modelo que englobe todos os aspectos de uma comunidade (sociocomportamental e cognitiva), cuja dificuldade reside no fato de que há um conhecimento muito limitado sobre como essas esferas interagiriam durante uma evacuação real. Dessa forma, essa é uma abordagem possível para os decisores (gestores de desastres) compreenderem a complexidade e a dinâmica relacionada aos processos de evacuação e, com isso, construir melhores soluções, em termos respostas emergenciais, em uma determinada área e através da simplificação da realidade através de modelagem e simulação.

A gestão de emergências tem se concentrado historicamente no imediato e urgente tempo de um incidente, isto é, resposta e recuperação pós-catástrofe. No entanto, existe uma consciência crescente de que a gestão de emergências é muito mais complexa e abrangente do que tradicionalmente percebido. Embora a função principal da emergência é proteger a vida e a propriedade, uma abordagem abrangente da gestão de emergência envolve mais do que apenas respostas reativas aos incidentes à medida que eles se desdobram; também envolve o desenvolvimento de métodos para evitar incidentes em primeiro lugar e preparação para aqueles que inevitavelmente ocorrerão em algum momento no futuro.

O software selecionado para a implementação do modelo é AnyLogic®, que é uma ferramenta de modelagem de simulação multimetódica desenvolvida pela The AnyLogic Company Versão PLE (*Personal learning Edition*). Essa versão possui algumas limitações funcionais, por ser gratuita. Por isso, foi preciso dividir o cenário em 2 modelos de simulação: o primeiro para simular as evacuações na área delimitada no estudo, bem como analisar o nível de evacuação das áreas em que estão localizados os abrigos emergenciais temporários; e o segundo consiste em simular a distribuição de recursos e de socorro médico para o afetados.

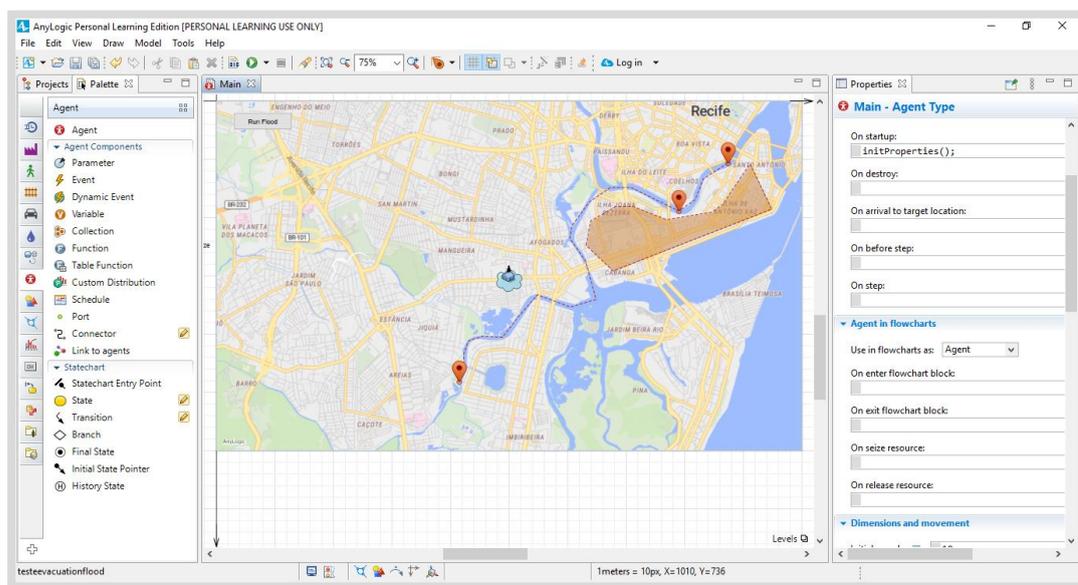
4.3.1 Modelo de evacuação

Para compreender o complexo comportamento das pessoas durante uma evacuação, para melhor análise e compreensão do problema, considerou-se a área em que havia os abrigos com maiores índices de utilidade esperada de acordo com o modelo proposto baseado em MAUT (seção 4.2), na Cidade de Recife, estado de Pernambuco, de modo a capturar com uma melhor precisão possível a dinâmica dos evacuados no caso de uma inundação repentina e medir os tempos das estratégias de evacuação que, sob hipóteses estocásticas, seriam necessárias se a evacuação fosse realizada.

O modelo simula o advento de uma inundação repentina ao longo da rota GIS do rio capibaribe e, portanto, o movimento dos cidadãos nas áreas afetadas para os abrigos selecionados. Para tanto, a SBA integra (ver Figura 20):

- o mapa do Sistema de Informação Geográfica (SIG);
- o gráfico de saída representando o número de pessoas advertidas, evacuando e evacuado em relação ao tempo; e
- o conjunto de variáveis, parâmetros, agentes e funções que utilizam dentro do modelo.

Figura 20 – Interface principal do software de simulação

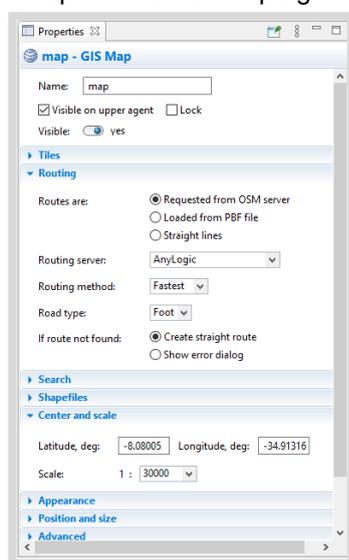


Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

AnyLogic fornece um *layer* de mapa Sistema de Informações Georreferenciadas (GIS), mapa este que é baixado em tempo real, a partir da base de dados de mapas online, como o OpenStreetMap. Nesse contexto, o método de roteamento é escolhido como o mais rápido (ao invés do mais curto); é um tipo de estrada a pé (ver Figura 21).

Figura 21 – Propriedades do Mapa georreferenciado



Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

O agente é o menor elemento de um modelo baseado em agentes, o elemento atômico de uma teoria generativa e alguns diriam até que a "agente é a teoria". Um agente é capaz de realizar ações sobre si mesmo e sobre outros agentes, receber insumos do ambiente e outros agentes e se comportam de forma flexível e autônoma, porque, como mostrado na Figura 22, um agente consiste de ambos estados e regras. (VAN DAM, NIKOLIC e LUKSZO, 2010). No modelo apresentado, os agentes, como mostrado na figura 4.19, são: *Main*, *Flood*, *Person*, *Property* e *Sensor*.

Figura 22 – Lista de Agentes



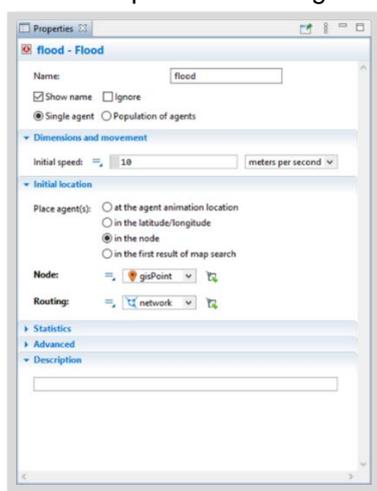
Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Por padrão, um modelo tem um tipo de agente *Main* para adicionar os demais agentes, mapas, parâmetros, funções e as regras de decisão e comportamento.

O agente *Flood* – estará representando o comportamento da inundação que acontecerá, de maneira simplificada, a partir da elevação do nível de água do rio capiberibe. Por isso, a inundação seguirá a rota criada no mapa GIS e tendo uma inicial velocidade padrão, incluída como uma propriedade no *Main* (fig 23).

Figura 23 – Propriedades do Agente *Flood*



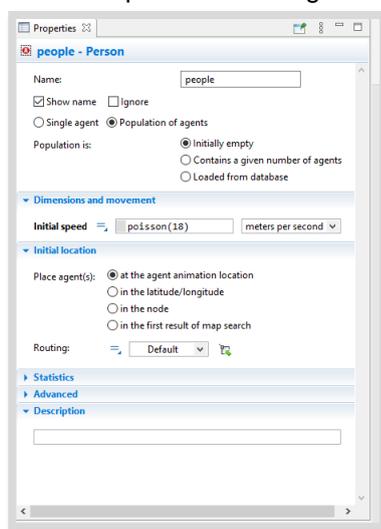
Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

O agente foi projetado a fim de seguir a função *floodFunction*, para definir o movimento da água de inundação no rio usando as variáveis que foram definidas.

O agente *Person* - representa as pessoas envolvidas na dinâmica de evacuação. Assim, o tamanho desse agente não será limitado a um, como no caso do agente de inundação, mas, sim, a uma população de agentes (fig. 24).

Figura 24 – Propriedades do Agente *Person*



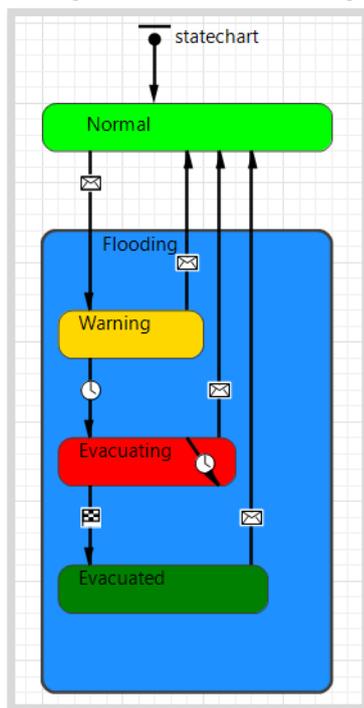
Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

A velocidade das pessoas seguirá uma distribuição de *Poisson*, com valores de taxa de chegada (λ) em uma faixa que pode ser configurada antes de iniciar a simulação.

O comportamento desse agente possui estados e transições estruturados em um diagrama de estados (ver fig. 25), com, basicamente, o uso de advertência (*Warning*) de evacuação devido a inundação.

Então, presume-se que a advertência seja feita a todas as pessoas da comunidade, mas nem todos a recebem ao mesmo tempo. Além disso, foi implementada uma resistência para a evacuação (*evacuating*), o que significa que uma certa porção de pessoas evacua enquanto um outra parte decide não o fazer, mas à medida que as coisas pioram as pessoas que decidem evacuar aumenta.

Figura 25 – Diagrama de estados do agente *Person*

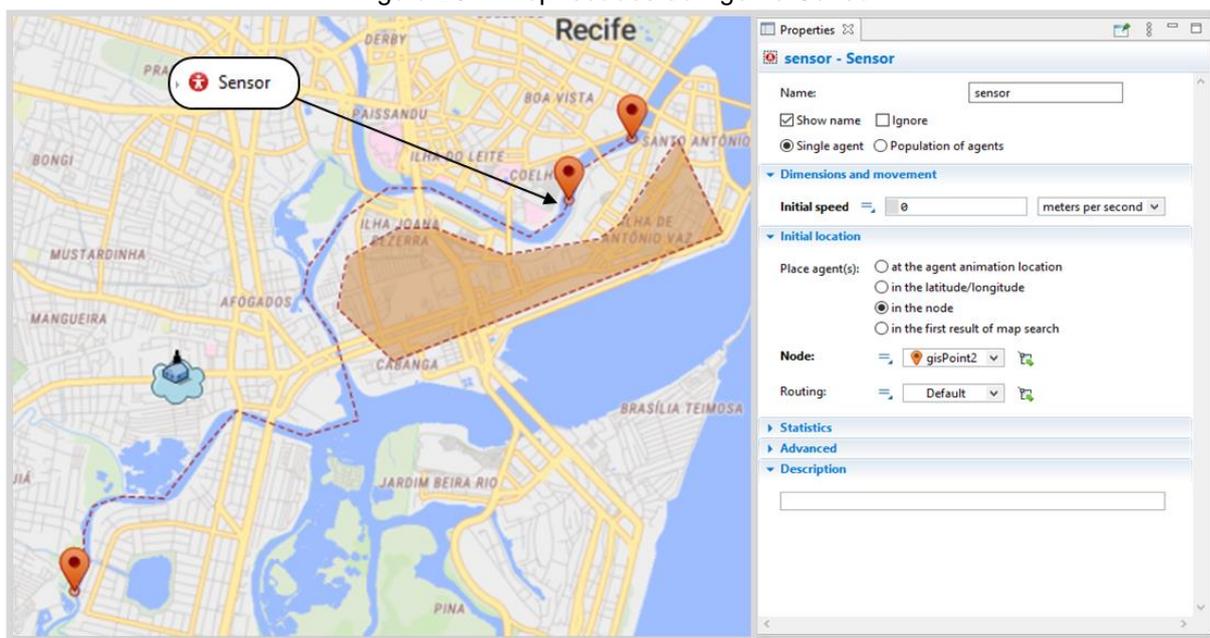
Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Agente *Sensor* – O ideal durante a ocorrência de um evento extremo é de que as pessoas recebam o aviso de inundação, que no nosso modelo será emitido pelo *sensor* e reajam a ele movendo-se para a zona de evacuação se suas casas estiverem localizadas na zona de inundação.

Para isso, o agente será localizado como um ponto georreferenciado no mapa (*G/S point*) (ver figura 26) e seu comportamento é estruturado por um diagrama de estado (ver figura 27) para definir diferentes estados do agente. Assume-se que esse agente tem dois estados principais:

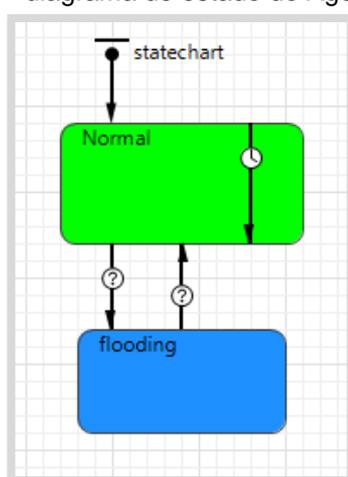
- Normal: quando o nível da água está abaixo de determinado nível (sem inundação); e
- Inundação: quando o nível da água está acima do nível normal e o aviso de inundação é emitido.

Figura 26 – Propriedades do Agente *Sensor*

Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Assim que as pessoas recebem o aviso e suas casas estão localizadas na zona de inundação, elas começam a se preparar e depois se movem para a zona de evacuação pré-designada. Elas permanecerão lá até que o aviso de inundação seja levantado. Quando o aviso de inundação é levantado pelo sensor, as pessoas que se abrigaram na zona de evacuação retornam às suas casas.

Figura 27 - diagrama de estado do Agente *Sensor*

Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Agente *Properties* - Esta população de agentes representa os edifícios habitados na área. As coordenadas do centroide de tais edifícios foram extraídas por um conjunto de

dados fornecido pela plataforma GIS Open Street Map, extraindo alguns dados em um arquivo .csv final composto por três colunas, representando o (1) identificação das propriedades, (2) Latitude e (3) Longitude. O agente é iniciado pela seguinte função *initProperties* no agente *Main*, então o arquivo .csv inicia os edifícios no Mapa GIS do modelo.

4.3.2 Modelo de logística humanitária

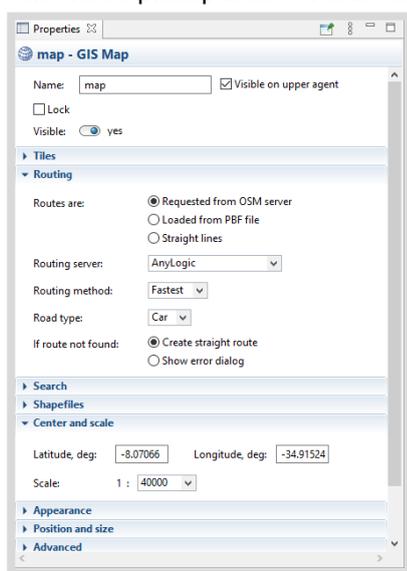
O Modelo de Logística Humanitária é estruturado no cenário em que o evento extremo acontece e segue a necessidade da resposta emergencial e assistência médica, se necessário, dos afetados, conforme o ciclo de gerenciamento de desastres demanda após a ocorrência de da catástrofe e sua conseqüente evacuação até os abrigos emergenciais temporários. O cenário analisado neste momento proporciona ao decisor um melhor entendimento das solicitações de ajuda humanitária de caráter emergencial.

De maneira simples, o modelo simula, através distribuição espacial dos abrigos que foram indicados na solução analítica da aplicação do modelo de seleção de abrigos baseado em utilidade (ver Seção 4.1), os pedidos de assistências emergenciais em cada abrigo, considerando dois tipos de solicitação emergencial: médica e de recursos para os abrigados. O modelo da simulação integra:

- o mapa do Sistema de Informação Geográfica (SIG);
- o conjunto de variáveis, parâmetros, agentes e funções que utilizam dentro do modelo; e
- saída dos valores de utilização do sistema de emergência por abrigo.

Da mesma forma do modelo anterior, utilizou-se um *layer* de mapa Sistema De Informações Georreferenciadas (GIS). O método de rota escolhido foi como o mais rápido (ao invés do mais curto) e um tipo de estrada através de veículos (ver Figura 28).

Figura 28 – Interface principal do software de simulação

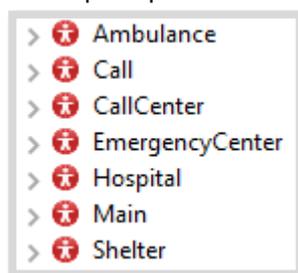


Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Os blocos de construção, isto é, os agentes utilizados para projetar este modelo para tentar o alcançar seus objetivos, em termos de identificar as demandas de assistência emergencial, durante o cenário de desastres foram: *Ambulance*, *Call*, *CallCenter*, *EmergencyCenter*, *Hospital*, *Main* e *Shelter*. Representando, respectivamente, os veículos das operações de logística humanitária, as solicitações, o centro de solicitações, O centro de emergência (defesa civil), hospitais, abrigos e *main* é o agente padrão do software no qual é estruturado o modelo (figura 29).

Figura 29 – Interface principal do software de simulação



Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

Conforme já esclarecido, o agente *Main* é o encapsulador dos demais elementos presentes na estrutura do modelo. O Agentes *Hospital*, *Shelter* e *EmergencyCenter* serão os agentes que receberão as informações georreferenciadas adquiridas pelo GIS *Open Street Map* e, então, terão suas distribuições espaciais ao longo da área em análise e melhor detalhado na tabela 11. Para simplificação do modelo, foram considerados apenas três hospitais para o atendimento médico e dois pontos regionais de apoio da Defesa Civil.

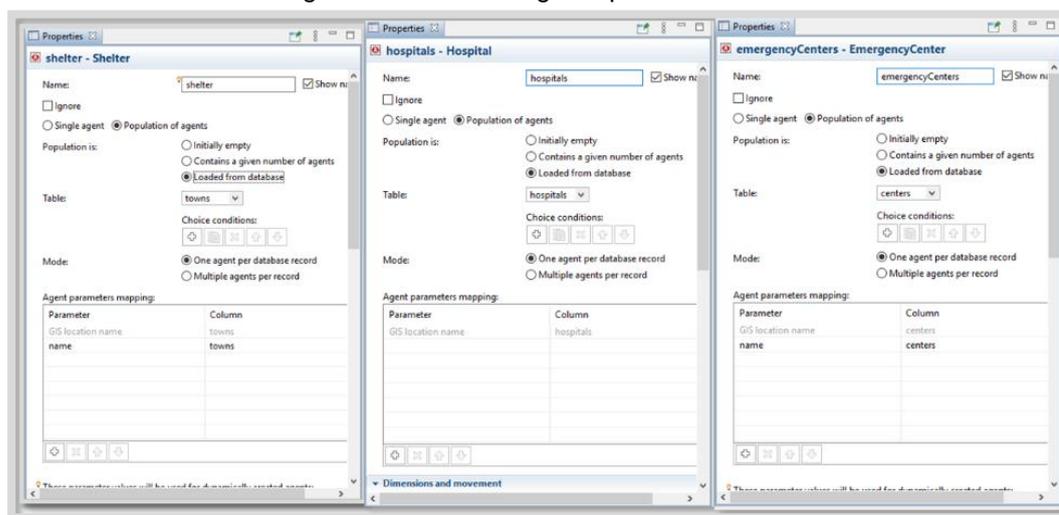
Tabela 11 – estrutura geoespacial do modelo

	Abrigos	Atendimento Médico	Defesa Civil
A1	Abrigo São José	Hospital Maria Cravo Gama	Prédio principal (Rua dos Palmares, 550, Santo Amaro.
A2	E.M Prof. José da Costa Porto	Hospital Ilha de Deus	Regional Oeste – Avenida San Martin, 2420, San Martin
A3	E.M do Coque	Hospital Provisório Recife 2	
A4	E.M Prof. Professor Josué de Castro		
A5	EM Almirante Soares Dutra		
A6	EM Colégio Reitor João Alfredo		
A7	EM Mércia de Albuquerque Ferreira		
A8	E.M Dos Remédios		
A9	E.M Edite Braga		
A10	E.M Engenheiro Umberto Gondim		

Fonte: O Autor (2021)

O agente *Shelter* representa os abrigos que estão assistindo os afetados pelo desastre hidrológico e necessitam de algum tipo de auxílio emergencial. Em caso de assistência médica, o atendimento será provido pelo agente *Hospital* e, por outro lado, os demais recursos de suprimento para os afetados será proveniente do agente *EmergencyCenter*, consequentemente, representando a defesa civil que em cenário de crise provocada pela inundação deverá está gerenciando os recursos toda a logística operacional humanitária. Os agentes são inicializados como população de agentes e com suas coordenadas da base de dados já mencionada (ver figura 30).

Figura 30 – estrutura geoespacial do modelo



Fonte: O Autor (2021)

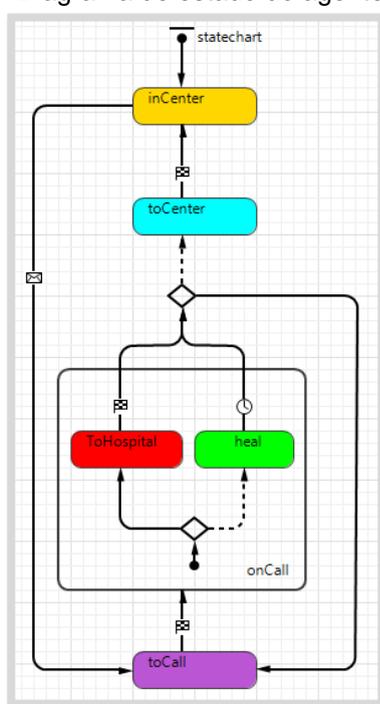
Nota: utilizando Anylogic (2021)

Os agentes *Call*, *CallCenter* e *Ambulance* serão os responsáveis pelas operações logísticas de atendimento humanitário. O Agente *Call* inicializado como um único agente recebe parâmetros que indicam quais tipos de atendimento e aonde o agente *Ambulance*

deve ir. O agente *CallCenter* recebe parâmetros para gerenciar as filas de atendimento das solicitações de cada abrigo e, por fim, o agente *Ambulance*, que representa os veículos, tem seu comportamento detalhado através de um diagrama de estados (conforme a figura31).

Basicamente, tal agente receberá uma solicitação de auxílio emergencial encaminhada da central de atendimentos (*CallCenter*), verificará o tipo de atendimento. Em caso de necessidade de hospitalização, a função *checkHospitalizationNeed* indicará a necessidade do tipo de atendimento médico. Caso contrário, o pedido será considerado como recurso emergencial e, a posteriori, é encaminhado de volta para o *center*, ou seja, defesa civil ou os hospitais.

Figura 31 – Diagrama de estado do agente *ambulance*.



Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando Anylogic (2021)

4.3.3 Simulação e resultados preliminares

As simulações foram executadas em um notebook ASUS, com as características listadas na Tabela 12, a seguir:

Tabela 12 – Especificação do computador utilizado para a simulação	
Sistema operacional	Microsoft Windows 10
Processador	Processor Intel® Core™ i5-3427U CPU @ 1.80GHz
RAM	RAM 4,00 GB (3,70 GB)
Tipo de Sistema	64 bit

Para simulação de evacuação, foram estabelecidos 3 cenários, a fim de explorar a possibilidade de pré-ajustar os parâmetros listados nas tabelas abaixo (tabela 13.). Devido ao esforço computacional e o tempo exigido pelo modelo, a abordagem para estudar três cenários diferentes tem sido considerada como a mais adequada, variando o tamanho da população, de acordo com a mesma distribuição de chegada aos abrigos usado nas dimensões do modelo multicritério (seção 4.1), a resistência dos agentes em evacuar e a velocidade de locomoção dos agentes. O parâmetro de velocidade da inundação foi mantido constante para analisar apenas o comportamento humano.

Tabela 13 – Parâmetros dos cenários

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Geração Aleatória da população (<i>randomFamilySize</i>)	Poisson (18)	Poisson (60)	Poisson (80)
Resistência a Evacuação	10 min	30 min	45 min
Velocidade da inundação (<i>Flood</i>)	10 m/s	10 m/s	10 m/s
Velocidade do Agente (<i>Person</i>)	10 m/s	6 m/s	2 m/s

Fonte: O Autor (2021)

Como primeiro passo, foi analisado um cenário padrão com um nível médio de "resistência" para receber a ordem de evacuação (*Warning*) e uma taxa menor de tempo de resistência para iniciar a fase de evacuação. O processo de evacuação dura em torno de 69 min após o aviso. Nesse cenário, a média de evacuados é em torno de 20% da em relação aos não evacuados. (tabela 14)

Tabela 14 Resultados da simulação de evacuação do Cenário 1

Nº	Tempo de evacuação (min)	Evacuados	Não evacuados
1	38,93	152	722
2	49,73	150	720
3	44,66	133	728
4	43,02	140	769
5	79,59	146	810
6	53,46	163	850
7	93,26	171	880
8	102,84	175	913
9	97,10	183	951
19	88,76	189	990
Média Tempo de Evacuação (μ_{t1})	Desvio Padrão do Tempo de evacuação (σ_{t1})	Média nº de evacuados (μ_{ev1})	Desvio Padrão do nº de evacuados (σ_{ev1})
69,1	25,4	160,2	18,9

Fonte: O Autor (2021)

No segundo cenário, o parâmetro de distribuição probabilística de geração aumenta para 60, a resistência ao aviso de evacuação aumenta para uma taxa de 45 min. e, também, a velocidade média dos residentes diminui. Com isso, os resultados apresentaram uma média de 16% em relação a população dos não evacuados (tabela 14). Ainda o tempo médio de evacuação também teve um acréscimo em comparação com o cenário 1.

Tabela 14 – Resultados da simulação de evacuação cenário 2

Nº	Tempo de evacuação (min)	Evacuados	Não evacuados
1	54,13	710	3408
2	52,62	542	3768
3	55,11	623	3532
4	85,88	435	3430
5	55,71	567	3731
6	103,42	564	3498
7	72,16	657	3282
8	107,73	564	3598
9	108,32	762	3684
10	107,95	435	3602
Média Tempo de Evacuação (μ_{t2})	Desvio Padrão do Tempo de evacuação (σ_{t2})	Média n° de evacuados (μ_{ev2})	Desvio Padrão do n° de evacuados (σ_{ev2})
80,303	25	585,9	106,3

Fonte: O Autor (2021)

Da mesma forma, segue a mesma lógica de incremento dos parâmetros populacionais e de resistência a evacuação, diminuindo a velocidade dos pedestres. A evacuação teve uma ocorrência média de 17%, não tendo muita sensibilidade em relação ao cenário anterior. (tabela 15)

Tabela 15 - Resultados da simulação de evacuação do Cenário 3

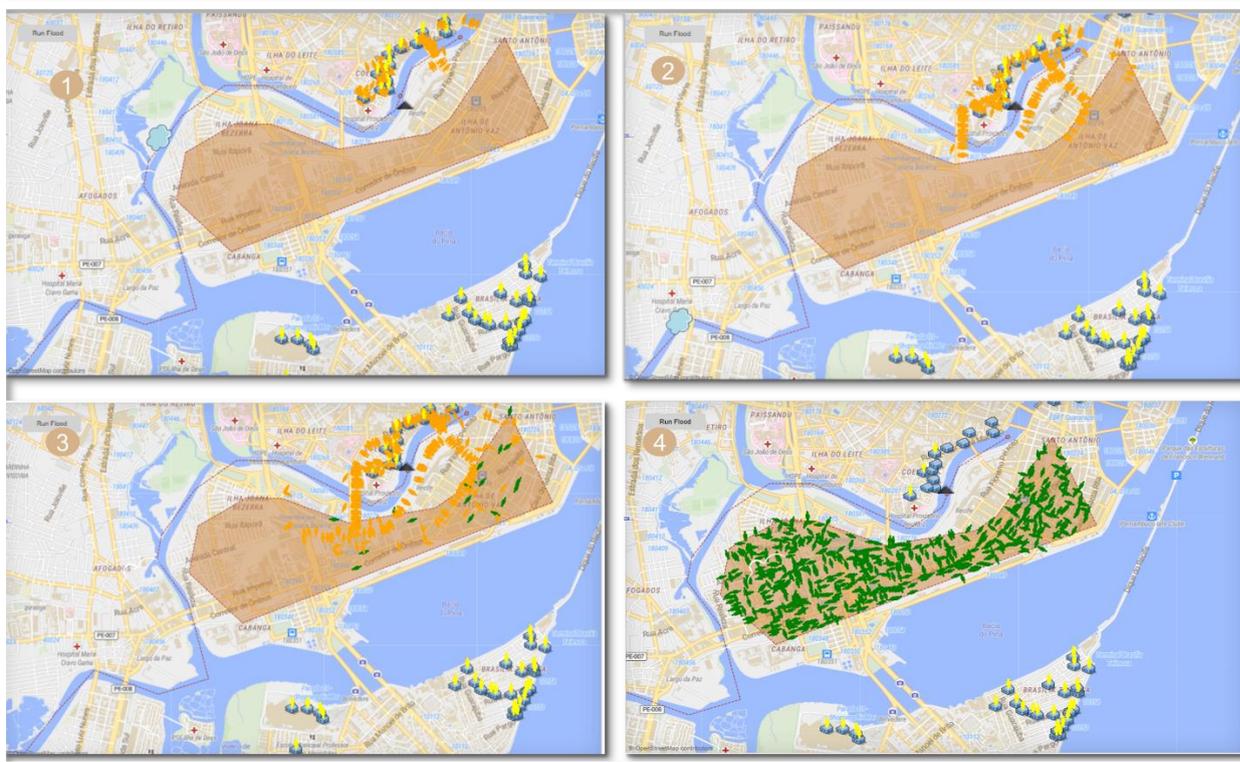
Nº	Tempo de evacuação (min)	Evacuados	Não evacuados
1	89,58	910	4368
2	117,76	765	4140
3	124,17	954	4288
4	98,02	689	5159
5	101,34	904	4313
6	95,26	457	4089
7	88,84	456	4848
8	101,55	985	4501
9	113,43	654	4361
10	109,62	975	4672
Média Tempo de Evacuação (μ_{t3})	Desvio Padrão do Tempo de evacuação (σ_{t3})	Média n° de evacuados (μ_{ev3})	Desvio Padrão do n° de evacuados (σ_{ev3})
104	11,92	774,9	204,4

Fonte: O Autor (2021)

A figura 32, a seguir, mostra o modelo de evacuação sendo executado, dividido em 4 etapas após a ocorrência da inundação. Os agentes em amarelo são a população gerada

inicialmente, os em laranja representam os em processo de evacuação até a zona demarcada de segurança, na qual estão os abrigos, e, logo após, os agentes ficam verdes indicando que estão evacuados e em segurança.

Figura 32 – simulação de evacuação em execução

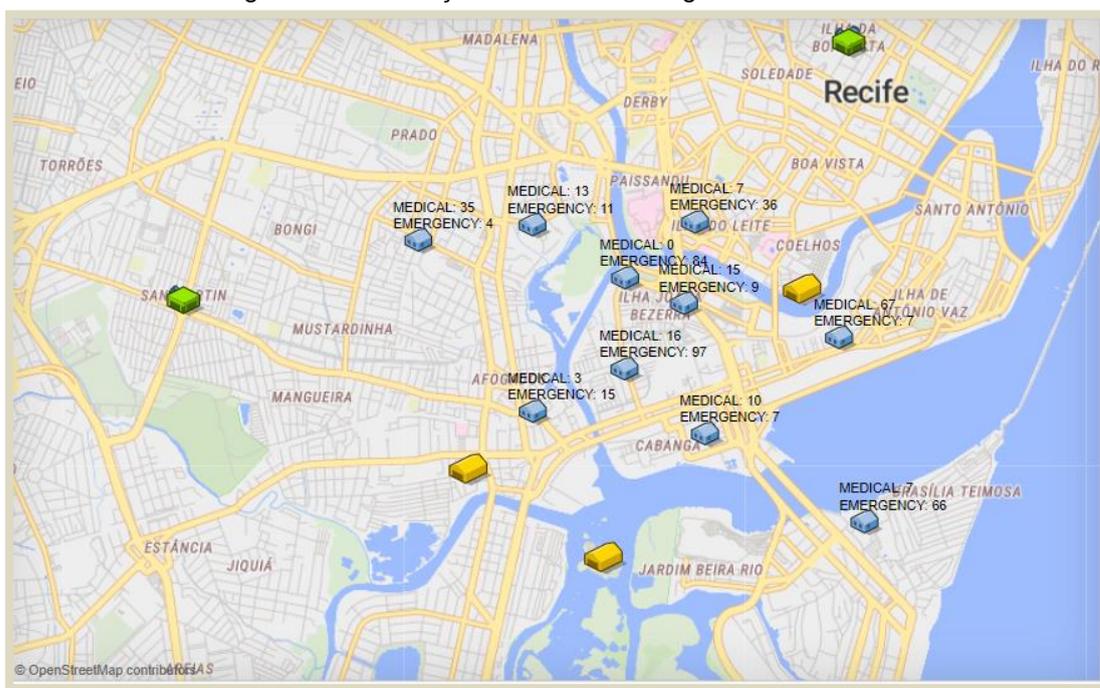


Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando o Anylogic (2021)

Para as operações de logística humanitária, foram simuladas 12 horas de assistência emergencial, assumindo as ocorrências de desastres geohidrológicos (deslizamento de terra e inundação) consequentes das chuvas severas. Os parâmetros foram configurados com o número inicial de 1 veículo em cada sede da defesa civil e 2 veículos em cada hospital, com o intervalo médio de 20 minutos para pedidos não-urgentes e o intervalo médio de 40 minutos para pedidos urgentes (ver figura 33).

Figura 33 - Simulação do modelo de logística humanitária

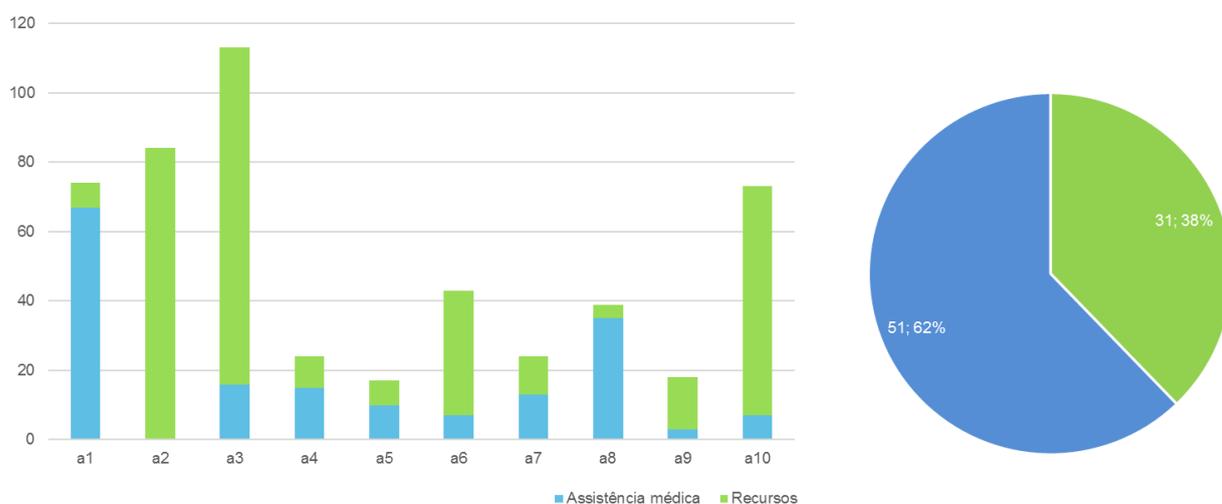


Fonte: O Autor (2021)

Nota: utilizando o Anylogic (2021)

O tipo de assistência mais solicitada foi a assistência médica com 62% dos pedidos e os demais tipos de recursos com 38%. No gráfico 4.3, está apresentado a quantidade de solicitações de ajuda emergencial em cada abrigos (alternativas) e uma comparação do tipo de ajuda em cada um deles. Alguns abrigos tiveram um número de solicitações médicas maiores como as alternativas A1 e A8 e, por outro lado, abrigos como A2, A3, A6 e A10 tiveram maiores números de pedidos dos demais recursos.

Gráfico 12 – Distribuição de pedidos por tipo e abrigos

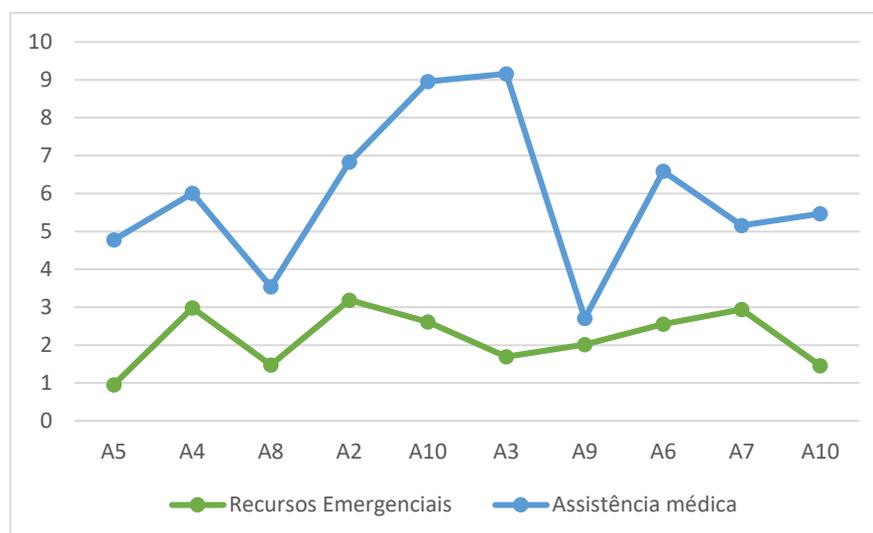


Fonte: O Autor (2021)

Ademais, no gráfico seguinte (gráfico 13) é possível verificar a distribuição por abrigo do tempo dispendido em cada operação de emergência durante a simulação, o nível de

serviço hospitalar mais elevado que a assistência de suprimentos mais básicos. Isto pode embasar a decisão, mediante a hipótese de um nível alto de afetados durante o processo de evacuação, da baixa eficiência em comunicação do alerta para evacuação ou dos residentes não saberem como agir durante o sinistro.

Gráfico 13 – Tempo utilizado de operações emergenciais por abrigo



Fonte: O Autor (2021)

Portanto, nota-se a importância das simulações de eventos extremos para auxiliar os gestores públicas a analisar a complexidade do comportamento dos agentes do cenário e, conseqüentemente, embasar a construção de políticas públicas mitigadoras dos riscos, bem como se preparar, em termos de medidas, em resposta aos desastres.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta seção encerra a dissertação, apresentando conclusões sobre os resultados encontrados, assim como limitações e sugestões para trabalhos futuros

5.1 Conclusões

No cenário de inundações surge a necessidade de técnicas confiáveis e precisas para determinar as áreas propensas a inundação e, sobretudo, para entender como os residentes devem agir de modo a garantir a sua segurança, 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.

Eventos extremos de chuvas severas possuem potencial para mostrar o tremendo gargalo presente nas competências e capacidades da gestão pública, tanto em relação ao planejamento urbano que permita uma convivência mais adequada da população urbana quanto em investimentos de prevenção de enchente, melhoria da drenagem, operações humanitária e gestão de emergências.

Os modelos propostos se mostraram capazes de auxiliar as decisões relacionadas as melhores práticas e abordagens de enfrentamento no contexto de ocorrência de desastres naturais. Durante situações extremas, é preciso ter planejamento bem desenhado para, então, ter agilidade operacional de responder rapidamente a mudanças rápidas de demanda e oferta, a fim de lidar com possíveis perturbações, identificado como o mais adequado e alinhado com a essência e as necessidades das operações humanitárias e de emergência.

A teoria da utilidade multiatributo pode ajudar os gerentes de emergência a compreender os valores conflitantes que devem ser ponderados em preparação do processo emergenciais. Já que nesses contextos é vital que os decisores lidem com dimensões de decisão conflitantes que são inerentes a decisões como o de evacuação, definir localização de abrigos e alocação de recursos. A teoria da utilidade multiatributos (MAUT) tem sido usada para identificar esses valores e uma aplicação com valores realísticos foi utilizado de decisão foi criado para identificar as principais alternativas consideradas para embasar o planejamento das ações que serão necessárias no advento das catástrofes. Dentre as vantagens, o modelo traz em sua estrutura axiomática uma modelagem probabilística capaz de sugerir as soluções considerando as incertezas intrínsecas ao cenário.

As abordagens de simulação relativamente novas, como o modelo baseado em agentes, têm o potencial para simular situações que seriam extremamente difíceis de replicar em condições normais. Apesar do esforço computacional acima mencionado levado pelo computador na execução das simulações apresentadas, o objetivo deste modelo relativamente simples não foi ser o estudo do comportamento da multidão durante a crise dos eventos extremos, mas, sim, a exploração de como este tipo de abordagem de simulação pode ter na definição de estratégias para operar em situações emergenciais, bem como ajudar os tomadores de decisões de planejamento urbano a alcançar um nível sustentável de resiliência nas cidades e nos edifícios em que operam.

No caso específico do modelo proposto na pesquisa, apesar das fortes suposições feitas, quase trivialmente a maior fonte de complexidade foi dada pelo número de pessoas a serem evacuadas, mostrando as multidões altamente densas tentando alcançar os centros de evacuação e o número de solicitações de assistência média, em sua maioria. Aqui, formuladores de políticas e gerentes de desastres devem, em sua maioria, colocar suas atenções.

Para tal, os decisores devem 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.

Portanto, a abordagem multicritério, quando associada a simulação baseada em agente, se mostra ainda adequada em cenários de emergência causados por eventos geohidrológicos, pois considera os vários impactos das inundações sobre o funcionamento dos espaços urbanos. A modelagem contribui na prática para reduzir o risco e magnitude dos impactos dos desastres de maneira eficiente e para compartilhar benefícios com todas as partes interessadas da área urbana, fornecendo recomendações coerentes, a partir de resultados mais robustos, bem como usos adicionais para o modelo de decisão, incluindo análise da política de evacuação e criação de cenários de treinamento

Assim, o decisor pode realizar uma análise aprofundada do leque de possibilidades, como resultado de quais alternativas podem ser escolhidas para implementar ações preventivas e de planejamento, beneficiando a comunidade urbana.

5. 2 Limitações e trabalhos futuros

Como limitações deste trabalho, destaca-se:

- 1) Ausência de dados para avaliação do impacto econômico sob aspectos de interrupção dos serviços públicos, descontinuidade de sistemas produtivos, custo

de interrupção do tráfego, perda de receita tributária devido a migração de empresas após as inundações, entre outros;

- 2) A falta de dados que permitam uma quantificação de impactos diretos e intangíveis, tais como os efeitos negativos nos ecossistemas e pessoas doentes devido o contato com a água;
- 3) A disponibilizados de informações de georreferenciadas gratuitamente na internet não permite distinguir entre o topo de edificações e o terreno. Portanto, prejudicou a precisão das localizações geográficas;
- 4) A falta de uma estrutura definida de comportamento humano a ser incluída nele, pois, em uma situação de emergência, a variável que mais afeta sua estocasticidade é, de fato, o aspecto humano, impulsionado pelas emoções e não assumindo consideração dos fatores irracionais; e
- 5) As limitações da versão do software utilizado, limitando o estudo a incorporar em um só modelo toda a dinâmica do cenário abordado, o que, separadamente, fez com que o modelo tendesse a simplificar em demasia as complexidades de interações que quase certamente verificarão no caso de um início de inundação.

Algumas sugestões para trabalhos futuros podem ser feitas:

- 1) Incorporar outras dimensões ao modelo, a fim de integrar, de uma maneira mais abrangente, o risco de inundação e as demais interações;
- 2) Incorporar os efeitos das mudanças climáticas nas áreas urbanas;
- 3) Desenvolver 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 auxiliar o planejamento e acompanhamento das ações emergenciais e garantir maior eficiência operacional em salvar e proteger vidas, melhorando, continuamente, o gerenciamento de emergências de desastres naturais e mitigar os riscos e perdas; e
- 4) Desenvolver um modelo que incorpore a tomada de decisão em grupo, podendo agregar diferentes perspectivas do problema.

REFERÊNCIAS

- ABAR, Sameera et al. Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software. **Computer Science Review**, v. 24, p. 13-33, 2017.
- ABDULLAH, Mohammad Fikry; SIRAJ, Sajid; HODGETT, Richard E. An Overview of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDM) Application in Managing Water-Related Disaster Events: Analyzing 20 Years of Literature for Flood and Drought Events. **Water**, v. 13, n. 10, p. 1358, 2021.
- ABEBE, Yared Abayneh et al. A coupled flood-agent-institution modelling (CLAIM) framework for urban flood risk management. **Environ. Model. Softw.**, v. 111, p. 483-492, 2019.
- AERTS, Jeroen CJH et al. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 3, p. 193-199, 2018.
- AFOLALU, Sunday A. et al. Queueing Theory an Index Factor for Production Inventory Control in Automotive Industry—A Review. **Trends in Manufacturing and Engineering Management**, p. 853-860, 2021.
- ALHUMAID, Mohammad et al. Sustainability evaluation framework of urban stormwater drainage options for arid environments using hydraulic modeling and multicriteria decision-making. **Water**, v. 10, n. 5, p. 581, 2018.
- AHMADLOU, Mohammad et al. Flood susceptibility mapping and assessment using a novel deep learning model combining multilayer perceptron and autoencoder neural networks. **Journal of Flood Risk Management**, v. 14, n. 1, p. e12683, 2021.
- ALENCAR, M. H.; ALMEIDA, A. T. DE. 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, abr. 2010.
- AN, Yan et al. Flood risk assessment using the CV-TOPSIS method for the Belt and Road Initiative: an empirical study of Southeast Asia. **Ecosystem Health and Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1765703, 2020.
- AN, Yan et al. Flood risk assessment using the CV-TOPSIS method for the Belt and Road Initiative: an empirical study of Southeast Asia. **Ecosystem Health and Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1765703, 2020.
- and its application to multi-criteria fuzzy group decision making. **Knowl. Based Syst**, v. 59, p. 132–141, 2014
- ANDARYANI, Soghra et al. Integration of hard and soft supervised machine learning for flood susceptibility mapping. **Journal of Environmental Management**, v. 291, p. 112731, 2021.
- AVEN, T. **Risk Analysis**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2015.
- AVEN, T.; RENIERS, G. How to define and interpret a probability in a risk and safety setting. **Safety Science**, v. 51, n. 1, p. 223–231, 2014.
- AVEN, Terje. Climate change risk—what is it and how should it be expressed?. **Journal of Risk Research**, v. 23, n. 11, p. 1387-1404, 2019
- AVEN, Terje. Three influential risk foundation papers from the 80s and 90s: Are they still state-of-the-art?. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 193, p. 106680, 2020.
- BHAMIDIPATI, Srirama; VAN DER LEI, Telli; HERDER, Paulien. A layered approach to model interconnected infrastructure and its significance for asset management. **European Journal of Transport and Infrastructure Research**, v. 16, n. 1, 2016.
- BORSUK, Mark E. Et al. Deliberative multiattribute valuation of ecosystem services across a range of regional land-use, socioeconomic, and climate scenarios for the upper Merrimack River

watershed, New Hampshire, USA. **Ecology and Society**, v. 24, n. 2, 2019.

BRASIL. **Manual de Proteção e Defesa Civil: Glossário de Proteção e Defesa Civil**. 5a ed. Brasília: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil – SEDEC, 2009.

BRASIL. Política Nacional de Proteção e Defesa Civi – PNPDEC. Lei Nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm> Acesso em 03 setembro de 2021.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. **Boletim Da Sala De Situação: 2º Trimestre De 2020**. 18 DE OUTUBRO DE 2020. Disponível em:<<http://www2.cemaden.gov.br/wp-content/uploads/2020/10/Boletim-da-Sala-de-Situa%C3%A7%C3%A3o-2%C2%BA-Trimestre-de-2020.pdf>> Acesso em 16 de setembro de 2021.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ESTUDOS E PESQUISAS SOBRE DESASTRES - CEPED. **Capacitação em gestão de riscos [recurso eletrônico]** /. – 2. ed. – Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE PESQUISA E ESTUDOS SOBRE DESASTRES - CEPED. **Gestão de desastres e ações de recuperação** / [Organização Janaína Rocha Furtado]. - Florianópolis: CEPED UFSC, 2014. <<https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2013/02/livro-completo-1-1.pdf>> Acesso 31 de agosto 2021.

COSTACHE, Romulus; BARBULESCU, Alina; PHAM, Quoc Bao. Integrated Framework for Detecting the Areas Prone to Flooding Generated by Flash-Floods in Small River Catchments. **Water**, v. 13, n. 6, p. 758, 2021.

COSTACHE, Romulus et al. Using GIS, remote sensing, and machine learning to highlight the correlation between the land-use/land-cover changes and flash-flood potential. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1422, 2020.

CHEN, SaiFei et al. Route Choice Behavior Modeling for Emergency Evacuation and Efficiency Analysis Based on Type-II Fuzzy Theory. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, 2021.

CIULLO, Alessio et al. Socio-hydrological modelling of flood-risk dynamics: comparing the resilience of green and technological systems. **Hydrological sciences journal**, v. 62, n. 6, p. 880-891, 2017.

CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. **Now is the time to not give up. Natural Disasters 2019**. Brussels. 2020. Disponível em: < <https://www.cred.be/publications>> Acesso em 24 de setembro 2021.

CRED e UNISDR (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and UN Office for Disaster Risk Reduction), 2015. **The Human Cost of Weather-Related Disasters 1995–2015**. Disponível em: https://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf> Acesso em 24 de setembro 2021]

CRED e UNISDR (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and UN Office for Disaster Risk Reduction). **Natural Disasters The Non-Covid year in disasters: Global trends and perspectives**. 2021. 2021. Disponível em: < <https://www.cred.be/publications>> Acesso em 24 de setembro 2021.

DA SILVA, Lucas Borges Leal et al. GIS-based multidimensional decision model for enhancing flood risk prioritization in urban areas. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 48, p. 101582, 2020.

DA SILVA, Lucas Borges Leal; ALENCAR, Marcelo Hazin; DE ALMEIDA, Adiel Teixeira. Multidimensional flood risk management under climate changes: bibliometric analysis, trends and strategic guidelines for decision-making in urban dynamics. **International Journal of Disaster**

Risk Reduction, p. 101865, 2020.

DAI, Qiang et al. A hazard-human coupled model (HazardCM) to assess city dynamic exposure to rainfall-triggered natural hazards. **Environmental Modelling & Software**, v. 127, p. 104684, 2020.

DAKSIYA, Velautham; MANDAPAKA, Pradeep V.; LO, Edmond YM. Effect of climate change and urbanisation on flood protection decision-making. **Journal of Flood Risk Management**, v. 14, n. 1, p. e12681, 2021.

DAKSIYA, Velautham; MANDAPAKA, Pradeep V.; LO, Edmond YM. Effect of climate change and urbanisation on flood protection decision-making. **Journal of Flood Risk Management**, v. 14, n. 1, p. e12681, 2021.

DAWSON, Richard J.; PEPPE, Roger; WANG, Miao. An agent-based model for risk-based flood incident management. **Natural hazards**, v. 59, n. 1, p. 167-189, 2011.

De ALMEIDA, A. T. DE. **Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério**. 1. ed. São Paulo/SP, Brasil: Editora Atlas, 2014.

De 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.

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.

DIARIO DE PERNAMBUCO. MPPE convoca municípios a apresentarem plano de contingência por chuvas fortes. **Diário de Pernambuco**. Pernambuco, 11 de março de 2020. Disponível em: <<https://www.diariodepernambuco.com.br/noticia/vidaurbana/2020/03/mppe-convoca-municipios-a-apresentarem-plano-de-contingencia-por-chuva.html>> Acesso em 15 de setembro de 2021

DUBBELBOER, Jan et al. An agent-based model of flood risk and insurance. **Journal of Artificial Societies and Social Simulation**, v. 20, n. 1, 2017.

DUDIN, Alexander; KLIMENOK, Valentina I.; VISHNEVSKY, Vladimir M. **The Theory of Queuing Systems with Correlated Flows**. Cham: Springer, 2020.

EIVAZY, Hooshang; MALEK, Mohammad Reza. Flood management in aqala through an agent-based solution and crowdsourcing services in an enterprise geospatial information system. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 9, p. 420, 2019.

EM-DAT. **The Emergency Events Database**. Disponível em: <www.emdat.be>. Acesso em: 12 mar. 2021.

FANG, Zhice et al. Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 594, p. 125734, 2021.

FERRETTI, Valentina; MONTIBELLER, Gilberto. An integrated framework for environmental multi-impact spatial risk analysis. **Risk analysis**, v. 39, n. 1, p. 257-273, 2019.

FOGLIATTI, M. C. e Mattos, N. M. C. *Teoria de filas*, Rio de Janeiro, 2007;

FOGLIATTI, M.C. E N.M.C. MATTOS. **Teoria de Filas**. Interciência. 2007

GARCEZ, Thalles Vitelli; CAVALCANTI, Helder Tenório; DE ALMEIDA, Adiel Teixeira. A hybrid decision support model using Grey Relational Analysis and the Additive-Veto Model for solving multicriteria decision-making problems: an approach to supplier selection. **Annals of Operations Research**, p. 1-33, 2021.

G1. Fortes chuvas no final de semana causam alagamentos e transtornos no Grande Recife. **G1 PE**. Pernambuco, 11 de abril de 2021. Disponível em: <

<https://g1.globo.com/pe/paranambuco/noticia/2021/04/11/fortes-chuvas-no-final-de-semana-causam-alagamentos-e-transtornos-no-grande-recife.ghtml>> Acesso em 15 de setembro de 2021.

G1. PE contabiliza 102 desabrigados, 36 desalojados, 39 deslizamentos de barreiras e dois mortos em meio a fortes chuvas. **G1 PE**. Pernambuco, 14 de maio de 2021 Disponível em: <<https://g1.globo.com/pe/paranambuco/noticia/2021/05/14/paranambuco-contabiliza-102-pessoas-desabrigadas-e-36-desalojadas-devido-as-fortes-chuvas-e-39-deslizamentos.ghtml>> Acesso em 15 de setembro de 2021

GHAVAMI, Seyed Morsal; MALEKI, Jamshid; ARENTZE, Theo. A multi-agent assisted approach for spatial Group Decision Support Systems: A case study of disaster management practice. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 38, p. 101223, 2019.

GRIGORYEV, Ilya. AnyLogic 7 in three days. **A quick course in simulation modeling**, v. 2, 2015.

HAER, Toon et al. Integrating household risk mitigation behavior in flood risk analysis: An agent-based model approach. **Risk Analysis**, v. 37, n. 10, p. 1977-1992, 2017.

HAER, Toon; BOTZEN, WJ Wouter; AERTS, Jeroen CJH. The effectiveness of flood risk communication strategies and the influence of social networks—Insights from an agent-based model. **Environmental Science & Policy**, v. 60, p. 44-52, 2016.

HASSANPOUR, Sajjad; RASSAFI, Amir Abbas. Agent-Based Simulation for Pedestrian Evacuation Behaviour Using the Affordance Concept. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 25, n. 4, p. 1433-1445, 2021.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2014.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **Dados meteorológicos e Clima/Monitoramento**. Disponíveis em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em setembro de 2021.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Anuário Climático do Brasil: 2018. **Centro de Ciência do Sistema Terrestre. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais**, 2018. Disponíveis em: <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em setembro de 2021.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Cambridge, UK, and New York, NY, USA: Cambridge University Press. 2012 Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/> > . Acesso em 26 de setembro de 2021

IPEA. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. Disponível em: < <https://www.ipea.gov.br>>. Acesso em 20 abril 2021.

JENKINS, Katie et al. Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: Insights from an Agent-Based Model. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 159-168, 2017.

JIN, F. F., PEI, L. D., Chen, H. Y. & Zhou, L. G. Interval-valued intuitionistic fuzzy continuous weighted entropy

JOSHI, Mitali Yeshwant; FLACKE, Johannes; SCHWARZ, Nina. Do microfinance institutes help slum-dwellers in coping with frequent disasters? An agent-based modelling study. **International journal of disaster risk reduction**, v. 49, p. 101627, 2020.

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

KANO, Takeshi et al. An agent-based model of the interrelation between the COVID-19 outbreak and economic activities. **Proceedings of the Royal Society A**, v. 477, n. 2245, p. 20200604,

2021.

KEENEY, Ralph L.; RAIFFA, Howard; MEYER, Richard F. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. Cambridge university press, 1976

KERR, Cliff C. et al. Covasim: an agent-based model of COVID-19 dynamics and interventions. **PLOS Computational Biology**, v. 17, n. 7, p. e1009149, 2021.

KIYGI-CALLI, M.; WEVERBERGH, M.; FRANSES, P. H.. Forecasting time-varying arrivals: Impact of direct response advertising on call center performance. **Journal of Business Research**, v. 131, p. 227-240, 2021.

KOC, Kerim; IŞIK, Zeynep. Assessment of Urban Flood Risk Factors Using Monte Carlo Analytical Hierarchy Process. **Natural Hazards Review**, v. 22, n. 4, p. 04021048, 2021.

KOC, Kerim; IŞIK, Zeynep. Assessment of Urban Flood Risk Factors Using Monte Carlo Analytical Hierarchy Process. **Natural Hazards Review**, v. 22, n. 4, p. 04021048, 2021.

KOUTIVA, Ifigeneia et al. Investigating Decision Mechanisms of Statutory Stakeholders in Flood Risk Strategy Formation: A Computational Experiments Approach. **Water**, v. 12, n. 10, p. 2716, 2020.

KREIBICH, Heidi et al. A review of damage-reducing measures to manage fluvial flood risks in a changing climate. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 20, n. 6, p. 967-989, 2015.

KREIBICH, Heidi et al. Development of FLEMOcs—a new model for the estimation of flood losses in the commercial sector. **Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 55, n. 8, p. 1302-1314, 2010.

KALANTAR, Bahareh et al. Deep Neural Network Utilizing Remote Sensing Datasets for Flood Hazard Susceptibility Mapping in Brisbane, Australia. **Remote Sensing**, v. 13, n. 13, p. 2638, 2021

KUNZ, N.; REINER, G.; GOLD, S. Investing in disaster management capabilities versus pre-positioning inventory: A new approach to disaster preparedness, **International Journal of Production Economics**, forthcoming 2014, doi: 10.1016/j.ijpe.2014.11.002, 2014.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis** 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1991

LIU, Xuefen; LIM, Samsung. Integration of spatial analysis and an agent-based model into evacuation management for shelter assignment and routing. **Journal of spatial science**, v. 61, n. 2, p. 283-298, 2016.

LLORENTE-MARRÓN, Mar et al. Social vulnerability, gender and disasters. The case of Haiti in 2010. **Sustainability**, v. 12, n. 9, p. 3574, 2020.

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

LUMBROSO, D.; DAVISON, M. Use of an agent-based model and Monte Carlo analysis to estimate the effectiveness of emergency management interventions to reduce loss of life during extreme floods. **Journal of Flood Risk Management**, v. 11, p. S419-S433, 2018.

LUMBROSO, Darren et al. Risk assessment for flood incident management: framework and tools. 2007.

MATA-LIMA, H.; ALVINO-BORBA, A.; PINHEIRO, A.; MATA-LIMA, A.; ALMEIDA, J.A. Impactos dos desastres naturais nos sistemas ambiental e socioeconômico: o que faz a diferença? **Ambiente & Sociedade**,16(3), 45-64, 2014.

MATA-LIMA, H.; ALVINO-BORBA, A.; AGUIAR, R.; DRUMOND, J. Factors affecting flood disaster in Small Island Development State and potential adaptation measures: The case of Funchal city, Portugal. *Environmental Quality Management*, 2016, 25(3). doi: 10.1002/tqem.21458.

MATA-LIMA, Herlander et al. Factors affecting flood disasters in small island developing states and potential adaptation measures: The case of Funchal City, Portugal. **Environmental Quality Management**, v. 25, n. 3, p. 37-51, 2016.

MARTINS, Mateus Alves; GARCEZ, Thalles Vitelli. A multidimensional and multi-period analysis of safety on roads. **Accident Analysis & Prevention**, v. 162, p. 106401, 2021.

MCCLYMONT, Kerri et al. Flood resilience: a systematic review. **Journal of Environmental Planning and Management**, v. 63, n. 7, p. 1151-1176, 2020.

MEIRELES, Cecília. **Flor de poemas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1984.

MOREIRA, D. A. Pesquisa operacional: curso introdutório, São Paulo, 2007;

NARVÁEZ, L. Iavell, A. e Ortega, GP (2009). **La gestión del riesgo de desastres: um enfoque basado em procesos**. **Secretaría General de la Comunidad. Andina**, Lima, 2009.

NACHAPPA, Thimmaiah Gudiyangada et al. Multi-hazard exposure mapping using machine learning for the State of Salzburg, Austria. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2757, 2020.

NAUBI, Irena et al. Ranking of Skudai river sub-watersheds from sustainability indices application of PROMETHEE method. **International Journal**, v. 12, n. 29, p. 124-131, 2017.

NIETZSCHE, Friedrich. **Assim falava Zaratustra**. Nova Fronteira, 1884.

NIU, Yunyun et al. Strategy evolution of panic pedestrians in emergent evacuation with assailants based on susceptible-infected-susceptible model. **Information Sciences**, v. 570, p. 105-123, 2021

OMM. Weather-related disasters increase over past 50 years, causing more damage but fewer deaths, 31/08/2021

PALIAGA, Guido et al. A spatial multicriteria prioritizing approach for geo-hydrological risk mitigation planning in small and densely urbanized Mediterranean basins. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 53-69, 2019.

PHAM, Binh Thai et al. Flood risk assessment using deep learning integrated with multi-criteria decision analysis. **Knowledge-Based Systems**, v. 219, p. 106899, 2021.

REMA, V.; SIKDAR, K. Optimizing Patient Waiting Time in the Outpatient Department of a Multi-specialty Indian Hospital: The Role of Technology Adoption and Queue-Based Monte Carlo Simulation. **SN Computer Science**, v. 2, n. 3, p. 1-9, 2021.

ROY, Bernard. Comparing Actions and Developing Criteria. In: **Multicriteria methodology for decision aiding**. Springer, Boston, MA, 1996. p. 163-210.

RUBIO-ALIAGA, Alvaro et al. MCDM-based multidimensional approach for selection of optimal groundwater pumping systems: Design and case example. **Renewable Energy**, v. 163, p. 213-224, 2021.

SETTI, J.R. **Tecnologia de Transportes**. USP, São Carlos. 2002

SHAW, Rajib; KAKUCHI, Suvendrini; YAMAJI, Miki (Ed.). **Media and Disaster Risk Reduction: Advances, Challenges and Potentials**. Springer Nature, 2021.

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

- ŠPITALAR, Maruša et al. Analysis of flash flood parameters and human impacts in the US from 2006 to 2012. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 863-870, 2014.
- SPRISSLER, Tim. Flood Risk Brazil: Prevention, Adaptation and Insurance. 2011.
- TELLMAN, B. et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. **Nature**, v. 596, n. 7870, p. 80-86, 2021.
- TONN, Gina L.; GUIKEMA, Seth D. An agent-based model of evolving community flood risk. **Risk Analysis**, v. 38, n. 6, p. 1258-1278, 2018.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION [UNDRR]. (2017). Terminology. UNDRR. In: UN Office for Disaster Risk Reduction. <URL: <https://www.undrr.org/terminology>.> Acesso 31 de agosto de 2021.
- VAN DAM, Koen H.; NIKOLIC, Igor; LUKSZO, Zofia (Ed.). **Agent-based modelling of socio-technical systems**. Springer Science & Business Media, 2012.
- VAN WOENSEL T, VANDAELE N . "Modeling Traffic Flows with Queueing Models: A Review." Asia-Pacific **Journal of Operational Research**, 24(4), 435–461, 2007.
- VAN WOENSEL, Tom; VANDAELE, Nico. Modeling traffic flows with queueing models: a review. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 24, n. 04, p. 435-461, 2007.
- WINSTON, W. L. **Operations research: applications and algorithms**. 3 ed. California: Duxbury Press, 1994.
- WISNER, Ben; GAILLARD, J. C.; KELMAN, Ilan. Theories and stories seeking to understand hazards, vulnerability and risk. 2011.
- WU P.P.Y, MENGERSEN K. A Review of Models and Model Usage Scenarios for an Airport Complex System." **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 47, 124–140, 2014.
- YANG, Qing et al. Multi-agent simulation of individuals' escape in the urban rainstorm context based on dynamic recognition-primed decision model. **Water**, v. 12, n. 4, p. 1190, 2020.
- YU, Jia et al. Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 32, n. 9, p. 1884-1910, 2018.
- YU, Jia et al. Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 32, n. 9, p. 1884-1910, 2018.
- ZHU, H. et al. Decision-Making Framework for Evaluating Urban Flood Resilience: A Case Study in Yangtze River. **Sustainability** 2021, 13, 665. 2021.
- ZHU, Feilin et al. Real-time optimal flood control decision making and risk propagation under multiple uncertainties. **Water Resources Research**, v. 53, n. 12, p. 10635-10654, 2017.
- ZHU, Feilin et al. 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.
- ZOU, Qiang et al. The practical research on flood risk analysis based on IIOSM and fuzzy α -cut technique. **Applied Mathematical Modelling**, v. 36, n. 7, p. 3271-3282, 2012.
- ZOU, Qiling; FERNANDES, Daniel S.; CHEN, Suren. Agent-based evacuation simulation from subway train and platform. **Journal of Transportation Safety & Security**, v. 13, n. 3, p. 318-339, 2021.