|  |  |
| --- | --- |
| CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO – TCC | |
| (  X  ) PRÉ-PROJETO     ( ) PROJETO | ANO/SEMESTRE: 2024/1 |

MODELAGEM BASEADA EM AGENTE APLICADA A GESTÃO DE IMPACTOS DE DESASTRES URBANOS NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU/SC

Marcos Mattedi

Prof. Aurélio Faustino Hoppe – Orientador

Prof. Marcos Rodrigo Momo - Coorientador

# Introdução

Uma das questões mais intrigantes do processo de desenvolvimento socioeconômico em geral e do processo de urbanização em particular diz respeito a intensificação dos impactos dos desastres naturais (Choo; Yoon, 2024). Os desastres naturais compreendem o efeito emergente dos padrões de interação que se estabelecem entre sociedade e natureza. Mais precisamente, podem ser descritos de forma analítica como manifestações complexas e multidimensionais que surgem nos pontos de intersecção entre os sistemas físico-naturais e os sistemas socioeconômicos (Zuho et. al., 2020). Neste sentido, a destruição provocada por uma enchente é consequência da incapacidade de gestão dos padrões predominantes de ocupação do espaço e utilização dos recursos. Por um lado, a incapacidade de compreender adequadamente os condicionantes do evento; e, por outro, agir consistentemente sobre o efeito dos impactos. Isto significa que os desastres não são causados apenas pela intensidade do evento, mas também pela vulnerabilidade da população: quanto maior a vulnerabilidade de uma população no período pré-impacto, maior a destruição verificada no período pós-impacto.

Segundo Mattedi et al. (2024), a situação do Vale do Itajaí não parece diferente. Afinal, os impactos dos desastres acompanham o processo de formação e desenvolvimento da região. De acordo com Jansen et al. (2021), os primeiros registros remontam ao início de ocupação em 1852. Ao longo deste período registram-se 77 ocorrências, considerando apenas a cidade de Blumenau como referência. Sua intensificação nas últimas décadas está relacionada, principalmente, ao padrão predominante de ocupação do espaço e utilização dos recursos naturais. Este processo encerra um paradoxo curioso: intensificação dos impactos vem acompanhada do aperfeiçoamento progressivo dos mecanismos de gestão. Isto significa que apesar dos crescentes investimentos em mecanismos de previsão e ações de preparação verifica-se o aumento da destruição nos últimos anos. Considerado este processo em termos globais é possível identificar quatro tendências principais:

1. a ocorrência de desastres vem aumentando anualmente;
2. o número de pessoas afetadas por desastres está crescendo;
3. as perdas estão se tornando mais custosas;
4. as regiões mais pobres são as mais impactadas.

Segundo Barnes, Dunn e Wilkinson (2019), os desastres naturais têm sido objeto de muitos estudos nos últimos anos. De forma geral, estes estudos podem ser classificados em dois conjuntos de abordagens: a) Paradigma da Ameaça: se concentra nos fatores físicos desencadeadores em termos de Evento-Indivíduo (Tobin, Montz, 1997; Kelman, 2020); b) Paradigma da Vulnerabilidade: se concentra nos fatores contextuais Impacto-Organização (Phillips et al., 2010; Tierney, 2020). Neste sentido, enquanto a primeira abordagem enfoca o comportamento dos indivíduos em função da probabilidade de ocorrência dos fatores físicos desencadeadores, a segunda enfatiza a capacidade de resposta das comunidades em termos de organização social de preparação. Estes estudos permitiram estabelecer o Princípio de Continuidade entre o Tempo-1 (Pré-impacto) e o Tempo-2 (Pós-impacto): a hipótese subjacente indica que as condições de vulnerabilidade existentes no Tempo-1 se convertem em destruição no Tempo-2, conforme exemplifica a Figura 1. Ou seja, materializa: a) caracterização inadequada do fenômeno; b) incapacidade de implementar medidas consistentes (Mattedi, 2017).

Figura 1 – Ilustração do Princípio de continuidade

Gráfico, Gráfico de linhas

Descrição gerada automaticamente

Fonte: elaborado pelo autor.

Os trabalhos realizados por Wilenski e Rand (2015), mas também a revisão sistemática realizada por Zhuo e Han (2020) indicam que os impactos dos desastres naturais podem ser analisados através de modelagem e simulação. A simulação compreende uma técnica utilizada para replicar o funcionamento de um sistema físico, biológico, econômico, social ou técnico através de um modelo matemático ou computacional. Já o conceito de modelo refere-se a uma representação abstrata e simplificada de um determinado fenômeno ou acontecimento (Abar et al., 2017). Também deve-se considerar que o objetivo principal de uma simulação é estudar o comportamento de um sistema em condições controladas, permitindo explorar hipóteses, prever resultados, analisar potenciais impactos de alterações no sistema, e testar soluções para problemas. Nesse sentido, a simulação por computador é particularmente valiosa para a compreensão e gestão de desastres naturais porque permite tanto a avaliação das medidas existentes, quanto a concepção e implantação de novas estratégias em função do padrão de comportamento social (Busaman, et al., 2024). Diante deste contexto, este trabalho visa, por um lado, avaliar o padrão predominante de gestão do município de Blumenau; por outro, subsidiar o processo de calibragem das políticas públicas de confrontação. Mais precisamente, o trabalho investiga a seguinte questão de pesquisa: o porquê apesar dos crescentes investimentos e complexificação do sistema de gestão verifica-se uma tendência de intensificação dos impactos dos desastres na região?

## OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo aplicar *Agent-Based Model* (ABM) para simular e compreender os efeitos contraintuitivos dos padrões predominantes de gestão dos desastres urbanos em Blumenau.

Os objetivos específicos são:

1. investigar modelos matemáticos que possam aprimorar a eficiência e a precisão das simulações, permitindo avaliar com maior precisão os impactos dos desastres na cidade;
2. integrar dados geoespaciais aos modelos de simulação de desastres, visando aprimorar a representação do ambiente físico da cidade e a precisão das previsões de eventos catastróficos;
3. avaliar o modelo utilizando dados fornecidos pela Defesa Civil de Blumenau, para validar a eficácia e a utilidade prática da abordagem proposta na gestão de desastres urbanos na cidade.

# trabalhos correlatos

Nesta seção examinou-se estudos que subsidiam a consecução dos objetivos desta pesquisa. Neste sentido, o exame da literatura disponível revela uma preocupação crescente tanto na concepção quanto na aplicação de ABM à compreensão e gestão de desastres naturais. Os trabalhos correlatos sevem de referência para: 1) subsidiar a compreensão da concepção do modelo de simulação através de ABM; 2) possibilitar o conhecimento das ferramentas de implementação. Considerando estes dois propósitos os trabalhos foram selecionados segundo quatro critérios principais: a) relevância teórica e metodológica (estudos que modelam fenômenos relacionados a desastres naturais através de ABM); b) os trabalhos foram selecionados considerando o fator de impacto da revista, a atualidade do artigo e quantidade de citações; c) além disso, foi priorizado também os trabalhos que apresentaram maior aplicabilidade e inovação ao tema de análise; d) além disso, procurou-se contemplar também a questão da diversidade espacial dos estudos considerados.

## An Agent-Based Model of Evolving Community Flood Risk

O estudo aborda a compreensão dos aspectos temporais do risco de inundações do Red River na cidade de Fargo, Dakota do Norte (EUA) (Dann; Guikema, 2017). Para isso, baseia-se na análise dos componentes comportamentais, de engenharia e de perigos físicos, através de simulações de 50 anos visando avaliar as decisões e eventos. Além disso, busca desenvolver uma nova abordagem de modelagem para integrar comportamentos, políticas, perigos de inundações e intervenções de engenharia. Mais precisamente, concebe um modelo baseado em agentes para analisar a influência de medidas de proteção contra inundações, comportamento individual, políticas, subsídios e ocorrências de inundações e eventos quase-acidentais no risco de inundações comunitárias​. Neste sentido, constitui uma abordagem interdisciplinar, na medida em que propõe a combinação teorias de percepção de risco, comportamento de mitigação de desastres e modelagem de sistemas complexos.​ Por isso, ao integrar abordagens de várias disciplinas e enfatizar a importância das ações tanto no nível individual quanto comunitário, o estudo subsidia a abordagem das inundações por meio de ABM.

Dann e Guikema (2017) ressaltam que, por um lado, o risco de inundação é frequentemente estudado utilizando modelos hidrológicos e hidráulicos; e, por outro, as decisões de gestão do risco de inundação são tomadas com base em modelos de custo-benefício sobre níveis de risco aceitáveis. Porém, estes modelos comportam muita incerteza, pois não conseguem captar os impactos das políticas comunitárias e das decisões individuais na evolução do risco de inundações ao longo do tempo. Por isso, o risco de inundações é gerido, frequentemente, por medidas estruturais (projetos hidráulicos) ou medidas não estruturais (regulamentos, seguros e monitoramento). Estes projetos costumam ser implementados em base comunitária ou regional, incluindo medidas como, por exemplo, sistemas de alerta e planos de evacuação, como diques e barragens, entre outros (Dann; Guikema, 2018). Contudo, estratégias de confrontação mal delineados acabam agravando os impactos das inundações na medida em que difundem uma falsa imagem de segurança pois estimulam a ocupação de áreas de risco: cria um ciclo de desenvolvimento e mitigação estrutural de inundações.

Considerando estes aspectos, o estudo concentra-se em duas questões principais: 1) Como o risco de inundação na comunidade evolui ao longo do tempo, à luz dos resultados estocásticos das inundações, do comportamento individual e das intervenções comunitárias? 2) Quais são os pontos fortes e as limitações da modelação baseada em agentes como ferramenta para simular a evolução do risco de inundações? Por isto, parte da seguinte hipótese: “a interação de políticas, comportamento individual e medidas de mitigação de inundações pode resultar em mudanças imprevistas na vulnerabilidade às inundações que não são capturadas por modelos padrão baseados em engenharia” (Dann; Guikema, 2018, p. 1259). Ou seja, o processo de tomada de decisão baseado em modelos convencionais acaba intensificando o impacto dos desastres na medida em que se fundamenta numa falsa imagem de segurança. Para testar essa hipótese, os atores concebem um ABM com as seguintes características: a) divulgação de informações sobre gestão de cheias; b) instalação de proteção comunitária contra cheias; c) elevação de equipamento mecânico doméstico; d) elevação de habitações.

Neste sentido, o estudo de Tonn e Guikema (2021) foi conduzido por meio de um conjunto de etapas iterativas. Cada passo simula um ano de decisões e impactos, permitindo uma análise detalhada dos efeitos acumulativos das medidas ao longo do tempo. Por um lado, foi simulada as inundações (elevação de inundações anuais e cálculo de danos e população em risco); por outro, as ações baseadas na percepção de risco e enfrentamento (não fazer nada, demandar para a comunidade, elevar equipamentos mecânicos ou a própria casa). Este processo é crucial para entender como as intervenções em pequena escala podem evoluir para impactos significativos sobre o risco de inundações na comunidade (efeito *bottom up* do ABM). Através das simulações do ABM, foi possível explorar cenários variados e suas repercussões, oferecendo uma compreensão aprofundada das dinâmicas complexas entre as ações humanas e os riscos ambientais em contextos de inundações. As simulações são ajustadas para refletir cenários baseados em dados históricos e projeções, garantindo que os resultados sejam aplicáveis em ações de planejamento e intervenções de mitigação.

Dann e Guikema (2021) indicam que quatro variações do modelo foram testadas através dos seguintes procedimentos: a) Base: regras de decisão básicas sem movimento de entrada ou saída de agentes; b) Uso do Solo (US): agentes que podem sair da área se a percepção de risco for alta; c) Vizinho (V): agentes influenciados pelos resultados de inundações e comportamentos de mitigação dos vizinhos; d) Uso do Solo e Vizinho (US-V): combina as características do US e V. A base de dados utilizados para validação do modelo incluiu: a) Localização do Estudo: Fargo, Dakota do Norte, ao longo do Rio Vermelho do Norte (A área de estudo inclui 2.124 terrenos); b) Dados de Elevação de Inundação: dados de elevação de pico anual de inundações coletados da USGS para o período de 1942-2013; c) Dados Demográficos e de Propriedade: dados GIS extensivos foram obtidos da cidade de Fargo. Assim, cada versão do modelo foi executada 500 vezes para garantir a confiabilidade estatística utilizando curvas de dano-profundidade e simulações para estimar os impactos financeiros das inundações. A Figura 2 exemplifica o gasto anual na gestão de inundações.

Figura 2 – Média de dano anual em dólares

Gráfico, Gráfico de dispersão

Descrição gerada automaticamente

Fonte: Dann e Guikema (2021, p. 1267).

Os dados fornecidos pelas simulações, conforme visto na Figura 2, indicam que o risco de inundações tende a diminuir numa comunidade ao longo do tempo devido à mitigação do agente e da comunidade. Antes da mitigação comunitária, os danos anuais médios variam de $ 3.431.480,00 a $ 4.452.000,00 dependendo da configuração do modelo; já, após a mitigação comunitária, os danos médios caem drasticamente, indo de $ 30.407,00 a $ 72.242,00. Isto acontece porque a implementação de mitigação pelos agentes também varia: com a mitigação comunitária, o número de agentes que implementam medidas varia de 12 a 292. Sem mitigação comunitária, o número aumenta, variando de 22 a 315. Isso demonstra que as medidas não só reduzem os custos médios, mas também protegem significativamente contra eventos extremos. Segundo os autores: “A mitigação dos agentes e a mitigação da comunidade estão interligadas, com uma maior mitigação dos agentes geralmente resultando numa menor mitigação da comunidade, e vice-versa.” (Dann; Guikema, 2018, p. 1275). Portanto, verifica-se que a utilização de um ABM para descrever a evolução do risco de inundação permite simular a relação entre eventos de inundação, ação individual e ação comunitária.

Dann e Guikema (2021) ressaltam que a principal limitação relativa ao uso de um ABM para esta aplicação está relacionada a necessidade de desenvolver suposições e simplificações em relação às regras comportamentais para a ação individual e coletiva. Ou seja, a suposição o risco individual e a percepção de enfrentamento, o número de demandas e danos para ação comunitária seja linear. Os resultados apresentados pelo modelo são sensíveis a mudanças em nestes parâmetros, como limiares de percepção de risco e adaptação individual. Isto acaba afetando não somente a aplicabilidade, mas também a precisão das previsões do modelo em diferentes cenários ou comunidades. Isto acontece porque as características geográficas e sociais da área estudada influenciam fortemente os resultados fornecidos pelo modelo. Isto acaba limitando a generalização do modelo a outras regiões. Além disso, a aplicabilidade do modelo a outras regiões exige dados geográficos de alta qualidade, além de dados sobre decisões individuais e coletivas. Por isto, os autores assinalam a importância de incluir, em simulações futuras, e, principalmente, ajustes das regras comportamentais.

## An agent-based model to simulate inhabitants’ behavior during a flood event

A pesquisa aborda a questão da avaliação das diferentes estratégias de mitigação de risco de enchentes em áreas urbanas a cidade de La Ciotat (França) (Taillandier et al., 2021). Os autores ressaltam que para avaliar o padrão de gestão é necessário considerar o comportamento humano. Nesse sentido, indicam que existem diferentes modelos e abordagens que permitem modelar e simular o comportamento das pessoas durante uma inundação. Porém, observam que apesar do considerável progresso recente destes modelos nenhum deles consegue responder a todos os desafios exigidos para avaliação dos modelos de gestão: 1) simular o evento de inundação; 2) integrar informação geográfica, 3) ter em conta comportamentos complexos dos habitantes considerando a emoção e o conhecimento parcial; 4) permitir diferentes estratégias para os habitantes; 5) ter em conta a degradação das infraestruturas e o seu impacto no seu funcionamento; 6) garantir a generalidade e flexibilidade do modelo para poder aplicá-lo a qualquer território. Por isso, para dar conta desses desafios, o artigo propõe o desenvolvimento de um novo modelo baseado em Agente, denominado SiFlo.

O modelo SiFlo é um ABM dedicado a simular eventos de inundação em áreas urbanas com base na relação entre o espalhamento da água e a reação dos moradores. Para os autores o “modelo SiFlo é capaz de simular a dinâmica complexa das respostas humanas a inundações, mostrando como diferentes estratégias e conhecimentos afetam os resultados de inundações em uma comunidade” (Taillandier et al., 2021, p. 4). Nesse sentido, partem do pressuposto que os moradores de uma área de risco poderiam realizar diversas ações em relação à enchente: proteção (proteger sua casa, seus equipamentos e móveis), evacuação (considerando o modelo de trânsito), obter e dar informações (considerando conhecimentos imperfeitos), entre outras. Para atingir estes objetivos, os autores estabelecem um ABM integrado *Geographic Information System* (GIS) e o *Belief-Desire-Intention* (BDI). Mais precisamente, dados espaciais genéricos e abertos por meio do GIS e emoções, relações sociais e normas sociais através do BDI. Por isso, recorre a uma abordagem interdisciplinar pois implica, ao mesmo tempo, recursos extraídos das ciências sociais e das ciências geofísicas caracterizado como SiFlo.

Considerando estes fatores, a simulação SiFlo é efetuada com 9 tipos de agentes:  a) Pessoas: habitantes que são afetados pelo evento de enchente e cujos comportamentos afetam a resposta ao desastre; b) Rede: malha de comunicação e interações sociais entre os habitantes e que influencia as decisões durante o desastres; c) Edifício: estruturas residenciais ou comerciais no ambiente urbano que podem ser afetadas pela água, sofrendo danos ou servindo como abrigos seguros; d) Estrada: elementos críticos da infraestrutura urbana que quando impactados alteram os padrões de movimento das pessoas e a resposta; e) Rio: fonte natural de água que em caso de enchente transborda e impacta diretamente as áreas urbanas circundantes; f) Dique: estruturas construídas para conter as águas de enchentes e proteger áreas vulneráveis; g) Carro: veículos que podem ser usados para evacuação, mas que também podem representar riscos se operados ou estacionados em áreas inundadas; h) Instituição: organizações governamentais ou não-governamentais que desempenham papéis na gestão do risco de desastres; i) Mundo: representa o sistema mais amplo ou o ambiente em que todos os outros agentes operam, influenciando e sendo influenciado por condições globais, como mudanças climáticas e políticas de gestão de desastres.

Segundo Taillandier et al.​ (2021), o modelo SiFlor integra o compartilhamento de informações e o conhecimento sobre riscos, e modela estratégias de evacuação e proteção. O modelo utiliza dados de GIS para criar uma representação detalhada do ambiente, que inclui estradas, edifícios e redes hidrográficas, facilitando a simulação dos movimentos e decisões dos agentes baseados no ambiente real em que estão inseridos. No núcleo do SiFlo, a arquitetura BDI permite a simulação de comportamentos complexos, onde cada agente baseado em pessoa pode avaliar sua situação (crenças), formular objetivos (desejos) e planejar ações (intenções) em resposta a inundações. Esse mecanismo é reforçado pela capacidade dos agentes de processar emoções, o que pode alterar suas decisões, especialmente sob condições de estresse durante um evento de inundação. Isto indica que o comportamento dos indivíduos tem impactos significativo nas consequências dos desastres. A dimensão reflexiva dos agentes constitui um fator decisivo na simulação dos impactos produzidos por desastres na medida em que os indivíduos em situação de vulnerabilidade apreendem (adaptação) conviver com o risco.

No estudo de Taillandier et al.​​ (2021) foram configurados diversos cenários para teste do modelo SiFlo, focando em estratégias diferenciadas de gestão de risco de inundações e o comportamento dos habitantes. Os cenários variam desde a situação atual, sem intervenções específicas, até estratégias que envolvem a manutenção adequada de canais e rios e a educação completa da população sobre os riscos e procedimentos durante inundações. Cada cenário é avaliado com base em indicadores como número de mortos, feridos, carros e edifícios inundados, ou seja, avaliados em função da intensidade e magnitude do impacto. Isso permite uma comparação direta dos efeitos de diferentes abordagens de gestão de risco, destacando a eficácia de medidas preventivas e a importância de informar a população. O modelo fornece uma base sólida para tomada de decisões estratégicas, mostrando como ações proativas, como limpeza de rios e canais e campanhas de conscientização, podem mitigar significativamente o impacto das inundações.

Neste sentido, a simulação indica que a eficácia das estratégias de mitigação de riscos e o impacto do comportamento humano nas consequências de uma enchente dependem de:

1. Comportamento Humano: o comportamento dos habitantes tem um impacto significativo nas consequências de uma enchente (quanto maior a participação da comunidade melhor a gestão dos riscos desastres).
2. Modelagem de Comportamentos Complexos: ao incorporar emoções, relações sociais e conhecimento parcial dos habitantes, o modelo permite uma simulação mais realista das decisões humanas em tempo real e das interações durante o evento.
3. Estratégias de Evacuação e Proteção: a simulação demonstrou que as diferentes estratégias de evacuação e proteção influenciam diretamente a segurança dos habitantes e a eficácia geral da resposta à enchente (quanto mais efetiva a implementação, mais seguras as estratégias)
4. Flexibilidade e Genericidade do Modelo: O modelo demonstrou ser flexível e genérico o suficiente para ser aplicado a diferentes territórios (pode ser usado como uma ferramenta para planejamento e treinamento em diferentes contextos geográficos e sociais).
5. Simulações como Ferramenta de Conscientização: O uso de simulações baseadas em agentes permite sensibilizar os stakeholders e a população em geral sobre os riscos de enchentes e as melhores práticas de resposta e preparação.

Por fim, Taillandier et al. (2021)​ ressaltam que o modelo SiFlo constitui uma ferramenta robusta e flexível. Afinal, permite simular o comportamento humano durante eventos de inundação, destacando a eficácia de diferentes estratégias de mitigação de riscos. Neste sentido, uma das principais conclusões é a importância da manutenção de infraestrutura e da educação da população em reduzir os impactos adversos das inundações. No entanto, é preciso assinalar também que o estudo apresenta limitações, como, por exemplo, a dependência de dados geográficos precisos e a complexidade em modelar comportamentos humanos sob condições extremas, que podem variar significativamente entre eventos. E, sobretudo, o fato que emoções e representações são muito voláteis. Por isto, como extensões futuras, os autores sugerem a necessidade de incorporação de mais variáveis comportamentais e ambientais, bem como a expansão para outras regiões e tipos de desastres naturais. Estas alterações poderiam melhorar a generalização e a aplicabilidade do modelo em diferentes contextos de planejamento urbano e gestão de desastres.

## An agent-based model to simulate human responses to flash flood warnings for improving evacuation performance

Zhang et al. (2024, p. 2) investigaram como os avisos de enchente rápida (enxurradas) podem ser mais eficazes pela aplicação de ABM ao caso da cidade de Liulin/China. Neste sentido, o modelo desenvolvido pelos autores inclui três submódulos: a) Aviso Precoce: caracteriza-se pela comunicação do risco; b) Social: os processos psicológicos e comportamentais após receber os avisos; c) Inundação: usado para simular os processos dinâmicos das enchentes. Além disso, a modelagem considerou também as interações sociais e a influência do ambiente físico. Com base nestes fatores, Zhang et. al. (2024, p. 2) apontam que “a taxa de vítimas foi estimada de acordo com os processos de mudança espaço-temporal dos residentes simulados pelo submódulo social e os fatores causadores de desastres de cheias simulados pelo submódulo de cheias”. Ou seja, o modelo tenta capturar a complexidade das decisões humanas que são influenciadas por fatores sociais, como, por exemplo, a influência de redes sociais e familiares, e fatores psicológicos, como o nível de confiança na informação do alerta.

O modelo baseia-se em dois tipos de agentes: a) Residentes: que inicialmente são distribuídos aleatoriamente nas residências devido à limitação de informações locacionais e se movem pelas redes viárias durante a simulação em busca refúgio em locais seguros; b) Autoridade Local: que emite alertas de enchente e implementa medidas de prevenção e mitigação. Neste sentido, a interação entre os agentes e o ambiente é dinâmica, possibilitando diversos padrões de interação. Por isto, os mapas de inundação afetam tanto a resposta dos residentes aos alertas quanto seus comportamentos de evacuação. Assim, durante a evacuação, presume-se que os residentes conheçam o caminho mais curto para os abrigos e que as velocidades de movimento sejam influenciadas pela presença de outros agentes e pela profundidade da água. O comportamento coletivo resultante e as taxas de fatalidade são então estimados pelo modelo considerando três fatores principais: 1) aspectos físicos das enchentes; 2) a tomada de decisão dos agentes baseada em seus atributos socioeconômicos e psicológicos; 3) a interação com os avisos de enchente e ações de comunicação de risco.

Segundo Zhang et al. (2024, p. 2), a validação do modelo foi efetuada em duas etapas: 1) Validação Teórica: a) Validação Conceitual: garantir que as teorias e hipóteses sociais e hidrológicas incorporadas refletissem compreensivelmente os cenários de enchentes; b) Validação de Parâmetros: uso de dados coletados da realidade; c) Simulação e Comparação: o modelo foi executado várias vezes para comparar com os dados reais de eventos de enchentes anteriores; d) Feedback dos Stakeholders: obteve-se opiniões de planejadores urbanos, autoridades de gestão de emergência e a comunidade local; e) Sensibilidade e Análise de Cenário: entender o impacto das variações nos principais parâmetros do modelo. 2) Validação Empírica: a) Dados sociais: entrevistas presenciais com residentes da área afetada para obter informações socio-demográficas e psicológicas dos residentes; b) Informações Hidrológicas: dados sobre as características físicas da enchente, como profundidade da água, velocidade do fluxo e extensão da inundação, foram coletados ou estimados para calibrar o sub-módulo de inundação do modelo; c) Informações de Infraestrutura: foram consideradas a configuração da rede viária, localização das residências e pontos de abrigo dentro da cidade para simular com precisão o movimento e a evacuação dos residentes (Zhang et al., 2024).

A principal constatação do estudo é que a antecedência dos avisos de enchentes repentinas não necessariamente resulta em melhor desempenho a gestão da crise. Afinal, os resultados obtidos indicam que um maior tempo de antecedência nos avisos de enchente não garante uma melhor evacuação. Isto acontece porque que um nível baixo de confiança nas informações pode levar os residentes a hesitarem em evacuar, optando por aguardar a evacuação de outros. Este processo está relacionado as características miméticas do comportamento humano: as pessoas em áreas de risco emulam o comportamento dos outros. Assim, verifica-se que quanto mais a comunicação de risco for centrada no ser humano, mais eficaz tende a se tornar. É que a eficácia da comunicação do risco não depende apenas dos avanços técnicos dos sistemas de alerta, mas também da sensibilidade às características sociais e culturais da população. Segundo os autores isto garante uma maior eficácia na mitigação dos danos e na proteção das vidas humanas em eventos de enchente. As simulações revelaram que a interação social e a dinâmica de opinião desempenham papéis significativos na formação das decisões de evacuação.

# proposta Do modelo computacional de simulação

Nesta seção será descrita a justificativa do estudo, definindo os requisitos funcionais e não funcionais e as metodologias adotadas para realização da pesquisa.

## JUSTIFICATIVA

O Quadro 1 apresenta uma comparação dos quatro trabalhos correlatos selecionados, destacando suas principais características. A disposição do quadro é a seguinte: cada linha representa uma característica distinta e cada coluna um trabalho correlato.

Quadro 1 – Comparativo entre as características dos trabalhos correlatos

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Trabalhos Correlatos  Características | Dann e Guikema (2017) | Taillabdier et al. (2021) | Zhang et al. (2024) |
| Objetivo do Estudo | Explorar a evolução do risco de inundações em comunidades integrando aspectos comportamentais, de engenharia e físicos através de um modelo baseado em agentes. | Simular o comportamento dos indivíduos considerando emoções, conhecimento parcial, e diferentes estratégias de enfrentamento à inundação. | Desenvolver um modelo ABM para simular respostas humanas a avisos de enchentes repentinas e melhorar a evacuação. |
| Metodologia | Utilização de um modelo baseado em ABM para simular influências diversas no risco de inundações comunitárias. | Utilização de ABM integrando dados GIS abertos e genéricos, um modelo cognitivo BDI considerando emoções, relações sociais e normas sociais. | Uso de um modelo ABM com módulos de aviso prévio, social e enchente em Liulin, China. |
| Abrangência Espacial | Focado em Fargo, Dakota do Norte, mas busca insights generalizáveis. | Aplicado à cidade de La Ciotat, no sul da França, para demonstrar a aplicabilidade do modelo. | Foca em Liulin, Hubei, China, área recentemente afetada por enchentes repentinas. |
| Amostragem e Dados | Baseada em dados geográficos e registros de inundações da área de estudo, além de suposições sobre comportamentos humanos. | Baseia-se em dados GIS para a modelagem do ambiente físico e BDI sobre comportamento humano, emoções e estratégias para lidar com inundações. | Dados de entrevistas com residentes, informações hidrológicas e uso de floresta aleatória para modelagem. |
| Resultados | Mitigação comunitária reduz danos futuros; ações individuais têm influência significativa no risco comunitário de inundações. | Mostra como diferentes estratégias e conhecimentos individuais afetam os resultados de inundações em uma comunidade. | Maior antecedência de avisos nem sempre melhora a evacuação; comunicação de risco centrada no ser humano é crucial. |

Fonte: elaborado pelo autor.

A partir do Quadro 1, pode-se notar que todos os trabalhos enfrentam desafios computacionais significativos relacionados à simulação. O modelo desenvolvido Dann e Guikema (2017) enfatiza a interação entre decisões individuais e comunitárias. Revela que a mitigação comunitária pode reduzir significativamente os danos futuros, mas a mitigação individual tem pouca influência sem a ocorrência de inundações. Já Taillabdier et al. (2021) integram dados GIS e BDI e descobrem que diferentes estratégias e conhecimentos sobre inundações influenciam as ações dos habitantes. Por sua vez, Zhang et al. (2024) enfatizam a importância da antecedência de avisos e a comunicação de risco como fatores críticos para uma evacuação bem-sucedida. Assim, embora todos abordem o risco de inundação com modelos ABM, as semelhanças se limitam a metodologia (abordagem), pois cada estudo foca em diferentes aspectos do comportamento humano frente às inundações, seja a mitigação ou a evacuação, e em diferentes localidades, demonstrando a versatilidade e a aplicabilidade dos ABMs em diversas condições e objetivos.

Considerando estes fatores, o desenvolvimento de uma simulação do processo de gestão dos desastres naturais no município de Blumenau através do ABM por meio da ferramenta GAMA se justifica por duas ordens de considerações complementares. Por um lado, o município de Blumenau constitui uma região que vem enfrentando os impactos dos desastres naturais, como inundações e deslizamentos e tem sido aplicadas diversas estratégias de gestão ao longo do tempo. Neste sentido, a capacidade de um ABM de simular as interações entre agentes autônomos e seu ambiente, permite a análise detalhada de como comportamentos individuais podem impactar e ser impactados por eventos de desastres. Ao modelar agentes que representam indivíduos, organizações ou componentes físicos dentro do ecossistema urbano de Blumenau, é possível observar padrões emergentes, avaliar estratégias de resposta e explorar cenários futuros. A ferramenta GAMA oferece um ambiente rico para essa modelagem, com suporte para a integração de dados geográficos reais, que são fundamentais para a simulação de desastres em contextos urbanos complexos. Assim, a combinação do ABM com a plataforma GAMA fornece uma base robusta para a investigação científica e a aplicação prática no gerenciamento de desastres.

Além disso, o desenvolvimento desta pesquisa fundamenta-se teoricamente na inexistência de trabalhos de simulação com relação ao caso do Vale do Itajaí em geral e de Blumenau em particular baseados em ABM. Neste sentido, a relevância e viabilidade da aplicação deste tipo de estudo é destacada pelos estudos de Dann e Guikema (2017) e Taillandier et al. (2021), bem como na análise de respostas humanas em Liulin, China (Zhang et al., 2024). Os estudos indicam que o uso de ABMs permite uma simulação mais precisa e adaptativa dos comportamentos humanos e das intervenções comunitárias em face de desastres naturais, como inundações. Estes modelos superam limitações de abordagens tradicionais baseadas puramente em hidrologia e engenharia ao incorporarem ações individuais e coletivas, estratégias de mitigação, e a dinâmica social complexa. A pesquisa mostra que os ABMs podem efetivamente reduzir os riscos e melhorar a gestão de desastres ao integrar medidas estruturais e não estruturais, influências comportamentais e políticas de resposta, resultando em uma avaliação mais holística e robusta da vulnerabilidade a inundações e eficácia das respostas de evacuação.

## REQUISITOS PRINCIPAIS DO PROBLEMA A SER TRABALHADO

O modelo de simulação computacional deverá contemplar a implementação dos seguintes Requisitos Funcionais (RF) e Requisitos Não Funcionais (RNF):

1. representação geográfica precisa (RF): integrar dados GIS para simulações precisas de eventos de inundação, contemplando a topografia e infraestrutura de Blumenau;
2. modelagem de agentes (RF): criar representações digitais detalhadas de moradores e infraestruturas com interações dinâmicas, refletindo o ambiente social e físico;
3. comportamento dinâmico (RF): simular respostas adaptativas dos agentes a eventos e mudanças, mostrando a capacidade de aprender e se adaptar a novas situações;
4. modelagem matemática (RF): construir um modelo aplicando a Teoria dos Jogos para estabelecer a matriz de utilidade entre os agentes;
5. interface de usuário intuitiva (RF): oferecer uma interface gráfica facilitada para interação, visualização e manipulação do modelo, acessível a usuários de todos os níveis técnicos;
6. análise de risco e vulnerabilidade (RNF): avaliar riscos e vulnerabilidades em Blumenau, identificando áreas críticas e a eficácia de medidas de adaptação;
7. modelo de comunicação (RNF): simular a disseminação de informações durante enchentes, incluindo a influência na percepção de risco e nas decisões dos agentes;
8. estratégias de resposta a desastres (RNF): incorporar práticas de gestão de desastres e simular interações complexas, incluindo feedback e aprendizado;
9. flexibilidade e escalabilidade (RNF): assegurar que o ABM seja adaptável a mudanças futuras e aplicável em outras regiões, permitindo atualizações conforme avanços científicos;
10. permitir utilizar o paradigma de programação orientada a agentes (RNF);
11. permitir ser desenvolvido na ferramenta GAMA (RNF).

## METODOLOGIA

O trabalho será desenvolvido observando as seguintes etapas:

1. revisão bibliográfica: busca de conceitos gerais de desastres, modelagem baseada a agentes e trabalhos correlatos;
2. levantamento dos requisitos: baseando-se nas informações da etapa anterior, reavaliar os requisitos propostos para a aplicação;
3. definição das ferramentas para modelagem e armazenamento das simulações: pesquisar e escolher as ferramentas mais apropriadas para a modelagem e armazenamento das simulações;
4. coleta e integração de dados: coletar e integrar dados geográficos e sociais relevantes de Blumenau por meio de dados topográficos, hidrografia, infraestrutura urbana e densidade demográfica, bem como registros históricos da Defesa Civil para calibração e validação do modelo;
5. construção do modelo: criar agentes com comportamentos baseados nas características demográficas e sociais dos habitantes de Blumenau e simular os comportamentos e interações por meio da programação das interações entre os agentes e com o ambiente, incluindo a reação a eventos de inundações e a adaptação a novas informações. Para isso, será utilizado modelagem matemática a partir de técnicas de Teoria dos Jogos;
6. implementação de interfaces: desenvolver uma interface de usuário que permita fácil acesso e manipulação do modelo, possibilitando que os usuários interajam com o sistema, modifiquem parâmetros e visualizem os resultados de simulações de forma clara e eficiente através da ferramenta GAMA;
7. simulação e análise: realizar simulações para testar diferentes cenários de gestão de desastres, incluindo a implementação de estratégias de mitigação, avaliando a eficácia das intervenções simuladas e analisar o comportamento dos agentes durante os eventos de inundações;
8. avaliação de riscos e vulnerabilidades: implementar algoritmos que analisem o risco e a vulnerabilidade de diferentes áreas e populações em Blumenau, identificando pontos críticos e populações em risco para avaliar a eficácia das estratégias de resposta e adaptação implementadas;
9. validação do modelo: validar o modelo usando dados reais e históricos para garantir que as simulações reflitam de maneira precisa a realidade dos desastres em Blumenau. Isso inclui a comparação dos resultados do modelo com dados históricos de desastres e *feedback* de especialistas locais.

As etapas serão realizadas nos períodos relacionados no Quadro 2.

Quadro 2 – Cronograma de atividades a serem realizadas

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 2024 | | | | | | | | | |
|  | jul. | | ago. | | set. | | out. | | nov. | |
| etapas / quinzenas | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| revisão bibliográfica |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| levantamento dos requisitos |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| definição das ferramentas para modelagem e armazenamento das simulações |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| coleta e integração de dados |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| construção do modelo |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| implementação de interfaces |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| simulação e análise |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| avaliação de riscos e vulnerabilidades |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| validação do modelo |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Fonte: elaborado pelo autor.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão abordados brevemente os principais assuntos que fundamentarão o estudo a ser realizado: desastres e Modelagem baseada a agentes.

Os desastres naturais constituem impactos negativos causados pela interação de fatores naturais e sociais. Esses impactos incluem eventos como, por exemplo, terremotos, tsunamis, furacões, tornados, enchentes, deslizamentos de terra, erupções vulcânicas entre outros (Alexander, 1995). A intensidade dos impactos não depende somente das características do evento, mas também da capacidade de resposta da comunidade (Perry; Quarantelli, 2005). Em termos políticos representam, ao mesmo tempo, uma ameaça, na medida em que representam um risco para as pessoas; mas também uma oportunidade, pois permitem redefinir o padrão de desenvolvimento local. Já em termos teóricos podem ser abordados partindo da análise do agente deflagrador do evento, ou, inversamente, pode-se abordar os desastres naturais a partir da capacidade de resposta da comunidade. Este processo envolve a consideração, simultaneamente, da adequação das formas cognitivas de caracterização do fenômeno (problema), como da consistência política das respostas (solução). Isto acontece porque os desastres naturais são desencadeados por uma complexa teia de causas e efeitos que desafiam as caracterizações políticas e técnicas convencionais.

Por isto, a estudo dos desastres naturais constitui uma área de pesquisa multidisciplinar. Afinal, envolvem disciplinas como geologia, meteorologia, hidrologia e ciências ambientais, mas também a sociologia, a economia e a ciências política. Nesse sentido, o entendimento e gestão dos desastres envolve tanto o conhecimento das características do agente físico desencadeador, quanto a capacidade de organização social da comunidade impactada. Afinal, um evento de mesma intensidade pode causar impactos distintos em diferentes comunidades. Consequentemente, a abordagem pressupõe, por um lado, a renúncia das análises lineares; e, por outro, uma análise mais completa e integrada, não apenas das causas, mas também das consequências. Com o avanço da capacidade de modelagem e das tecnologias de simulação, foi possível melhorar a compreensão e representação dos desastres naturais, permitindo uma preparação e resposta mais eficazes. Considerando estes fatores, portanto, em termos analíticos os desastres naturais podem ser descritos conceitualmente como efeito emergente dos padrões de interação que se estabelecem entre a dinâmica de organização social e o ambiente físico (Peek; Watchtendorf; Meyer, 2021).

Este nível de detalhamento multidimensional é particularmente difícil de ser entendido através das estratégias disciplinares convencionais de representação. As decisões locais dos agentes podem desencadear a emergência de comportamentos complexos não previstos em nível de sistema. Neste sentido, o objetivo principal de uma simulação visa estudar o comportamento de um sistema em condições controladas, permitindo explorar hipóteses, prever resultados, analisar potenciais impactos de alterações no sistema, e testar soluções para problemas complexos sem recorrer ao sistema real. Em termos analíticos costumam ser diferenciadas em duas grandes classes de modelos: a) Simulações Baseadas em Equações: metodologia de modelagem que utiliza equações matemáticas para representar as relações dinâmicas entre os componentes de um sistema; b) Simulações Baseadas em Computador: utiliza computadores para modelar e analisar o comportamento de sistemas complexos ao longo do tempo. Considerando as Simulações Baseadas em computador, duas estratégias se destacam: *Multi-Agent Sistems* (MAS) e *Agent-Based Model* (ABM).

Segundo Mahmoud (2020), o MAS é representado por um conjunto de agentes autônomos que interagem entre si para resolver problemas. Os agentes de um MAS possuem características como autonomia, capacidade de comunicação, cooperação, coordenação e, em alguns casos, negociação uns com os outros ou com humanos (Mahmoud, 2020). Essas características permitem que os agentes tomem decisões independentes e realizem tarefas em ambientes dinâmicos e, muitas vezes, incertos. Por isto, tem sido aplicado a vários domínios como, por exemplo, robótica, simulação social e econômica, gerenciamento de tráfico e logística, jogos e entretenimento, negociação automatizada, entre outros. Sua modelização e implementação, contudo, implicam desafios de coordenação e cooperação eficazes entre agentes, o gerenciamento de conflitos, além de questões relacionadas à segurança e privacidade nas interações. Este processo envolve: (i) definição dos agentes e do ambiente para determinação de qual é padrão de interação; (ii) especificação das interações e comunicações entre os agentes em termos sintáticos, semânticos pragmáticos; (iii) implementação da simulação do algoritmo de percepção, decisão, comunicação e ação.

De acordo com Wilenski e Rand (2015), o ABM constitui uma forma de modelagem computacional em que um fenômeno ou acontecimento é modelado em termos de agentes e suas interações. Modelos baseados em agentes simulam as operações e interações de vários agentes com sistema de nível macro focalizando o comportamento emergente dessas interações individuais. Cada agente representa uma entidade com comportamentos, estratégias, e objetivos próprios, operando dentro de um ambiente definido. O comportamento do agente é determinado por regras de interação entre si e com o meio ambiente e possui duas estratégias principais a) Top-down (do agregado ao individual); b) Bottom-up (do individual ao agregado). Mais precisamente, o ABM é utilizado para simular ações e interações de agentes autônomos (indivíduos ou coletividades). Em termos operacionais um ABM fundamenta-se em três etapas principais: (i) cria-se um conjunto de agentes, define seu comportamento e explora-se os Padrões Emergentes; (ii) observam-se Semelhanças/Diferenças entre os Padrões Emergentes e fenômenos no mundo; (iii) refina-se do modelo na direção dos fenômenos criando uma validação do Modelo Explicativo.

Embora as simulações desempenham um papel essencial na compreensão do processo de gestão dos desastres a implementação de cenários de desastres naturais com base em agentes constitui uma tarefa difícil. Isto é particularmente válido no caso de desastres recorrentes, onde o aprendizado e o conhecimento acumulado desempenham um papel decisivo. Simulações de enchentes com respostas físicas e sociais realistas são possíveis com modelagem e simulações baseadas em agentes. Por isso, neste estudo adotamos ABM pois esta estratégia de modelagem permite simular o comportamento dos agentes e estudar contextos complexos com maior simplicidade. ABMs têm sido amplamente utilizados na simulação de evacuações de emergência. Considerando a modelagem e simulação por meio de ABM um dos principais desafios da pesquisa na área é selecionar a estratégia adequada de implementação. No contexto de simulação existem três estratégias principais: 1) desenvolver a própria ferramenta de simulação; 2) recorrer a uma linguagem de uso geral e implementar os recursos necessários; 3) adotar os recursos e bibliotecas de uma ferramenta pronta.

Para simulação do ABM, segundo Gama (2024), utiliza-se a ferramenta de modelagem gráfica da plataforma GAMA. A plataforma GAMA é uma ferramenta amplamente utilizada para estudos de sistemas complexos. É especialmente popular em estudos onde são necessárias simulações detalhadas do comportamento humano e ambiental. Isto acontece porque a GAMA permite a criação e gestão de múltiplos agentes, cada um com seus próprios atributos e comportamentos. Os agentes podem interagir entre si e com o ambiente, o que é crucial para simular dinâmicas sociais e ambientais complexas. Além disso, a plataforma suporta nativamente dados GIS, facilitando a modelagem de ambientes baseados em localizações reais, e BDI que permite simular o processo de tomada de decisão dos agentes com base em suas crenças, desejos e intenções com base em normas sociais. Isto permite, ao mesmo tempo, uma simulação multiescalar do comportamento humano, que possibilita visualizar tanto a dimensão individual quanto agregada. E isso é particularmente útil em estudos do processo de gestão de desastres naturais pois permite a visualização e análise das simulações em tempo real.

Referências

ALEXANDER, D. **Natural disasters**. New York: Chapman & Hall, 1995.

ABAR, S. et al. Agent **Based Modelling and Simulation tools: a review of the state-of-art software**. Computer Science Review, v. 24, May, p. 13-33, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2017.03.001. Acesso em: 20 de abril de 2024.

BARNES, B.; DUNN, S.; WILKINSON, S. Natural hazards, disaster management and simulation: a bibliometric analysis of keyword searches. **Natural Hazards**, v. 97, p. 813–840, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-019-03677-2. Acesso em: 20 de abril de 2024.

BUSAMAN, A; McNEIL, R; CHUAI-AREE, S; ESO, M. A **Parallel Program for the Simulation of Flooding**. Disponível em: https://www.researchsquare.com/article/rs-4168242/v1 Acesso: 20 de abril de 2024.

CHOO, M.; YOON, D. K. A meta-analysis of the relationship between disaster vulnerability and disaster damage. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.102, n.15, fev. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104302. Acesso em: 05 de abril de 2024.

DANN, G. L; GUIKEMA, S. D. An Agent-Based Model of Evolving Community Flood Risk. **Risk Analysis**, v. 38, n. 6, p. 1258-1278, 2018. Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/risa.12939. Acesso em: 10 de abril de 2024.

GAMA Plataform. Disponível em: https://github.com/gama-platform/gama. Acesso em: 20 de abril de 2024.

JANSEN, G. R et al. Estruturação organizacional-institucional dos municípios na governança da gestão de risco de desastres em bacias hidrográficas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 18, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.21168/rega.v18e1. Acesso em: 13 de abril de 2024.

KELMAN, I. **Disaster by choice: how our actions turn natural hazards into catastrophes**. Oxford: Oxford University Pres, 2020.

MAHMOUD, M. **Multiagent Systems Introduction and Coordination Control**. London: CRC Press, 2020.

MATTEDI, M. A. et al. Aplicação do índice de vulnerabilidade socioambiental a desastres por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG): estudo de caso do município de Blumenau (SC). **J. Environ. Manag. & Sust**.,13(1), 1-43, e23423. Disponível em: https://doi.org/10.5585/2024.23423. Acesso em: 21 de abril de 2024.

MATTEDI, M. Dilemas e perspectivas da abordagem sociológica dos desastres. **Tempo Social**, v. 29, n. 3, p. 261-285, 2017. Disponível em: https://www.revistas.usp.br/ts/article/view/111685/136342. Acesso em: 20 de abril de 2024.

PEEK, L; WACHTENDORF, T; MEYER, M. A. Sociology of disasters**.  In**: SCHAEFER, Schaefer, C. B; MALIN, J. A; PEEK, L; PELLOW, D.N; HUANG, X. (eds) Handbook of Environmental Sociology. Handbooks of Sociology and Social Research. Springer, Cham. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77712-8\_11. Acesso em: 21 de abril de 2024.

Acesso em: 26 de abril de 2024.

PERRY, R. W.; QUARANTELLI, E. L. **Whats is a disasters? New answers to old questions**. New York: Xlibris Corporation, 2005.

PHILLIPS, B. D. et al. **Social Vulnerability to disasters**. New York: Taylor & Francis, 2010.

TIERNEY, K. **Disasters: a sociological approach**. Cambridge: Polity Press, 2020.

TOBIN, G. A; MONTZ, B. E. **Natural hazards: explnation and integration**. London: The Guildford Press, 1997.

TAILLANDIER, F. et al. An agent-based model to simulate inhabitants’ behavior during a flood event. [**International Journal of Disaster Risk Reduction**](https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-disaster-risk-reduction)**,** [v. 64](https://www.sciencedirect.com/journal/international-journal-of-disaster-risk-reduction/vol/64/suppl/C), oct. p. 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420921004647?ref=pdf\_download&fr=RR-2&rr=871b89a93cfdf90d#page=0.34. Acesso em: 11 de abril de 2024.

WILENSKI, U.; RAND, W. **An introduction to agent-based modeling: modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo.** Boston: MIT Press, 2015.

ZHANG, R. et al. An agent-based model to simulate human responses to flash flood warnings for improving evacuation performance. *Jornal of Hydrology*, n. 628, p. 1-15, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130452. Acesso em: 19 de abril de 2024.

ZHUO, L; HAN, D. Agent-based modelling and flood risk management: A compendious literature review. **Journal of Hydrology**, v. 591, dec. de 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125600. Acesso em: 20 de abril de 2024.