

Técnicas de Inteligência Computacional para Previsão e Mitigação de Eventos Climáticos Hidrológicos Extremos: Uma Revisão Sistemática

Filipe Pessoa Sousa¹

filipe.sousa@pos.ime.uerj.br

Augusto Magalhães Pinto de Mendonça²

augustompm@id.uff.br

Igor Machado Coelho²

imcoelho@ic.uff.br

Luiz Satoru Ochi²

satoru@ic.uff.br

Cristiane Oliveira de Faria¹

cofaria@ime.uerj.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão sistemática sobre o uso de técnicas de inteligência computacional na mitigação e previsão de Eventos Climáticos Hidrológicos Extremos (ECHE). Foram analisados diversos artigos do século XXI para mapear meta-heurísticas e algoritmos exatos aplicados, propondo uma classificação em macro domínios que organiza futuras abordagens. A pesquisa enfatiza a aplicação desses métodos em áreas como alocação de recursos, evacuação e monitoramento ambiental, visando aprimorar soluções eficazes no tratamento de desastres.

PALAVRAS CHAVE. Alagamentos, Revisão Sistemática, Inteligência Computacional.

Tópicos: SE-CRIS, IC – Inteligência Computacional, MH – Metaheurísticas.

ABSTRACT

This article presents a systematic review on the use of computational intelligence techniques in the mitigation and prediction of Extreme Hydrological Climatic Events (ECHE). Various 21st-century articles were analyzed to map the applied metaheuristics and exact algorithms, proposing a classification into macro domains that organizes future approaches. The research emphasizes the application of these methods in areas such as resource allocation, evacuation, and environmental monitoring, aiming to improve effective disaster management solutions.

KEYWORDS. Floods. Systematic Review. Computational Intelligence.

Topics: SS-CRIS, IC – Computational Intelligence, MH – Metaheuristics.

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro

R. São Francisco Xavier, 524 - Maracanã, Rio de Janeiro - RJ, 20550-013

²Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense

Av. Gal. Milton Tavares de Souza, São Domingos – Niterói – RJ CEP: 24210-346

1. Introdução

As recentes tragédias causadas por chuvas torrenciais no estado do Rio Grande do Sul (RS) destacaram a vulnerabilidade das regiões afetadas a eventos climáticos hidrológicos extremos [Petró, 2024]. Em várias localidades, os volumes de precipitação superaram recordes históricos, incluindo o de Guaíba [Tenente, 2024], resultando em inundações devastadoras que ocasionam perdas de vidas, danos materiais significativos e desabrigaram milhares de pessoas. Este contexto emergencial evidencia a urgência de se desenvolver e implementar estratégias eficazes de mitigação e prevenção de danos associados a tais eventos. A recente série de chuvas torrenciais é um exemplo alarmante desta tendência. As enchentes e alagamentos subsequentes não apenas interromperam a rotina diária e a economia local, mas também expuseram falhas na infraestrutura urbana e na capacidade de resposta a desastres [Teófilo, 2024]. O dano causado pelas chuvas chega a R\$ 1,7 bilhões em um cenário otimista [Catto, 2024], não só a população é atingida como negócios locais e toda uma cadeia logística sofre. Considerando a importância do tempo de resposta nestas situações de emergência, observa-se uma necessidade: uma classificação coesa e coerente das abordagens recentes existentes. A agilidade na tomada de decisões é essencial na mitigação dos impactos dessas ocorrências.

Diante desses desafios, a aplicação de técnicas de Inteligência Computacional tem mostrado potencial significativo. As meta-heurísticas, como Algoritmos Genéticos, Colônias de Formigas e Algoritmos de Otimização por Enxame de Partículas, são técnicas poderosas para otimização em problemas complexos de grande escala, como a alocação e agendamento de socorristas de resgate, considerando a fadiga do trabalho realizado durante desastres naturais [Nayeri et al., 2019] e a otimização do planejamento da evacuação de 70.000 vítimas na Austrália [Pillac et al., 2016]. Essas abordagens permitem simular cenários diversos e identificar soluções robustas que minimizam os impactos das inundações. Por outro lado, algoritmos exatos, como Programação Linear e Programação Dinâmica, fornecem soluções precisas para problemas estruturados, como o planejamento de pré-posicionamento de suprimentos de socorro considerando incertezas [Abazari et al., 2021] e a modelagem de ocupação de abrigos seguros durante inundações [Gama et al., 2016]. A combinação de ambas as técnicas pode oferecer uma abordagem híbrida eficaz, integrando a capacidade exploratória das meta-heurísticas com a precisão dos algoritmos exatos.

As mudanças climáticas desempenham um papel crucial no aumento da frequência e intensidade de chuvas torrenciais, o que ocasiona em um aumento no número de casos de alagamentos e enchentes que ocorreram. O aquecimento global provoca alterações nos padrões de precipitação, aumentando a incidência de eventos extremos, e são um fator preponderante que pode ter ocasionado no aumento de chuvas que resultou na tragédia no RS [Azevedo, 2024]. Diante destes desafios, torna-se imperativo buscar estratégias que aliem novas tecnologias à gestão de desastres. Tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT), sensores ambientais e sistemas de informação geográfica (SIG) podem melhorar significativamente a capacidade de monitoramento e resposta a eventos extremos. Ferramentas de previsão meteorológica avançada e sistemas de alerta precoce são fundamentais para prever inundações e minimizar seus impactos.

Outras inovações como o uso de drones e tecnologias de satélite também pode auxiliar na localização e resgate de pessoas em áreas inundadas, melhorando a eficácia das operações de emergência. A otimização do uso de drones foi abordada por Rottondi et al. [2021], onde foram realizadas otimizações das trajetórias baseadas em dados de São Francisco, Estados Unidos. Como exemplo da aplicação de satélites [Mallick et al., 2021], utilizaram imagens capturadas por satélites como parte da modelação da suscetibilidade a deslizamentos induzidos pela chuva.

As meta-heurísticas e os algoritmos exatos podem desempenhar um papel importante na criação de estratégias eficazes de mitigação das consequências causadas por enchentes ou alaga-

mentos, que são resultados de chuvas torrenciais como no Rio Grande do Sul. Como exemplos, se destacam na evacuação de pessoas idosas durante eventos de enchente [Yazdani e Haghani, 2023] e um modelo de otimização da distribuição de suprimentos de ajuda humanitária, que salvam vidas [Javadian et al., 2017]. O uso de meta-heurísticas e algoritmos exatos, aliados a novas tecnologias, oferece um caminho promissor para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas. Como exemplo, no trabalho dos autores [Ali Shatat et al., 2022], meta-heurísticas são combinadas com *Deep Learning* para criação de um modelo de previsão de chuvas, atuando antes que um eventual desastre aconteça. Investir em tais estratégias é crucial para aumentar a resiliência das comunidades e minimizar os impactos de futuros eventos climáticos hidrológicos extremos.

Neste trabalho, abordaremos a relevância das meta-heurísticas e algoritmos exatos no cenário de mitigação e prevenção de danos causados por chuvas e enchentes. Na metodologia, é detalhado um mapeamento sistemático utilizando o Método de Kitchenham [Kitchenham, 2004], um critério de seleção de artigos reproduzível que auxilia na revisão bibliográfica e proporciona uma análise coerente e atualizada da literatura. Os resultados serão apresentados para evidenciar as tendências e lacunas no uso dessas técnicas para prever e mitigar desastres naturais. Por fim, refletiremos sobre as implicações práticas dos achados, propondo recomendações para pesquisas futuras e para a implementação de estratégias efetivas de gestão de crises climáticas.

O presente trabalho é organizado em cinco seções, incluindo essa Introdução. A Seção 2 detalha a metodologia utilizada nessa pesquisa. Na Seção 3 é apresentada uma fundamentação teórica no tema, como fruto do mapeamento sistemático realizado. A Seção 4 detalha os resultados obtidos na pesquisa. Finalmente, a Seção 5 traz conclusões e perspectivas de trabalhos futuros no assunto, além de uma lista com 47 referências no assunto.

2. Metodologia

Nesta seção é detalhado um mapeamento sistemático utilizando o método de Kitchenham, um critério de seleção de artigos reproduzível que auxilia na revisão bibliográfica e proporciona uma análise coerente e atualizada da literatura. Este método permite uma abordagem rigorosa e estruturada para identificar, avaliar e interpretar todas as evidências relevantes para uma questão de pesquisa específica.

Seguindo o método utilizado, a revisão sistemática foi planejada em várias etapas: definição dos critérios de inclusão e exclusão, seleção das bases de dados a serem pesquisadas e elaboração de uma estratégia de busca detalhada.

- **Critérios de Inclusão:** Artigos publicados no século XXI que abordem a aplicação de meta-heurísticas ou métodos exatos para mitigar ou prevenir as consequências causadas por enchentes.
- **Critérios de Exclusão:** Artigos que não apresentem relevância direta ao tema ou estudos de caso específicos que não sejam generalizáveis.
- **Bases de Dados:** A base de dados Scopus foi selecionada para esta pesquisa. Inicialmente, a base de dados Google Scholar foi testada, mas apresentou muitos resultados fora do escopo do estudo. Embora haja uma limitação, visto que o Scopus é apenas um de muitos repositórios, pretende-se, em trabalhos futuros, investir esforços na inclusão de novos repositórios na pesquisa. A ampliação do número de repositórios permitirá uma cobertura mais abrangente da literatura existente, possibilitando a identificação de uma gama mais diversificada de estudos e avanços tecnológicos.
- **Estratégia de Busca:** A estratégia de busca envolveu o uso de palavras-chave e operações de busca booleanas, conforme a seguinte *string* de busca:

```
TITLE-ABS-KEY (("flood") AND ("disaster" OR "relief")
AND ("heuristic" OR "metaheuristic" OR "exact method"
OR "exact algorithm")) AND
(LIMIT-TO (SUBJAREA, "COMP")
OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "MATH")
OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "ENGI")
OR LIMIT-TO (SUBJAREA, "DECI"))
AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))
```

Na Figura 1 temos o fluxograma ilustrando o processo exclusão de cada artigo.

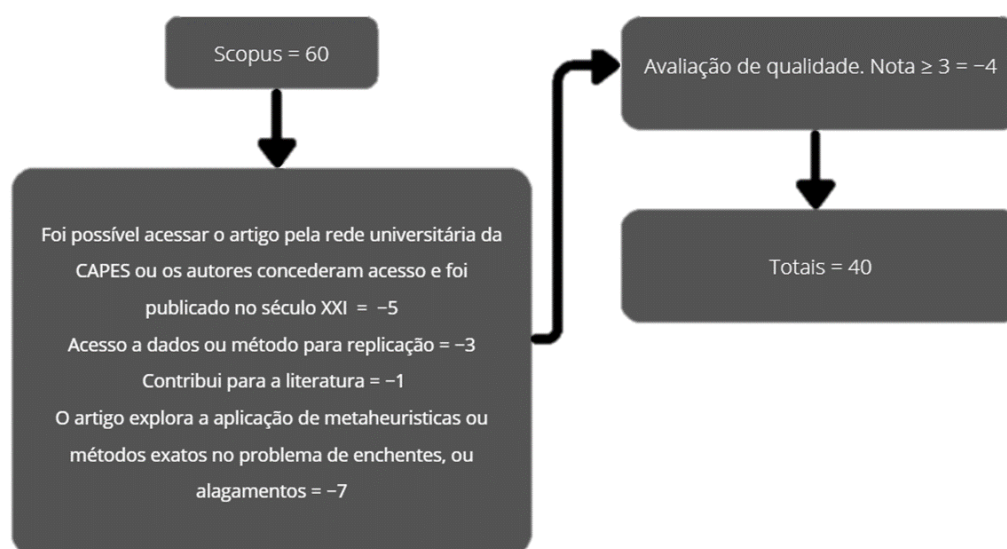


Figura 1: Fluxograma da triagem dos artigos

Na sequência, foi realizada a definição das questões de pesquisa que guiarão a revisão sistemática. Para este estudo, foi elaborado um questionário estruturado em três etapas. A primeira etapa consiste em uma sequência de perguntas classificatórias que permitem uma análise quantitativa inicial:

Avaliação Classificatória:

1. Foi possível acessar o artigo pela rede universitária da CAPES ou os autores concederam acesso?
2. O artigo fornece acesso aos dados utilizados ou a métodos para replicação?
3. O artigo contribui significativamente para a literatura existente sobre o tema?
4. O artigo explora a aplicação de meta-heurísticas ou métodos exatos?
5. O estudo aborda respostas a alagamentos ou enchentes?

6. O artigo foi publicado no século XXI

Após esta triagem, os trabalhos que passaram pelos critérios objetivos foram submetidos à segunda etapa do questionário, na qual foi realizada uma análise qualitativa, onde os trabalhos recebiam notas de zero a cinco, os trabalhos que obtinham nota igual ou maior que três passavam pelas seguintes perguntas:

Avaliação Qualitativa:

1. Em que medida o artigo aborda os desafios enfrentados pelas comunidades em situações de alagamentos ou enchentes pós-desastres?
2. Como o artigo avalia a eficácia das respostas implementadas para mitigar os impactos de alagamentos e enchentes?
3. Em que medida o artigo explora o uso de técnicas de inteligência computacional na gestão de desastres relacionados a alagamentos ou enchentes?
4. O quão original é a abordagem do artigo e qual a sua contribuição para a literatura existente sobre o tema?
5. Qual a qualidade metodológica do estudo (design do estudo, amostra, métodos de análise)?
6. Os resultados são apresentados de forma clara e coerente?
7. Qual o impacto dos resultados para a prática e a teoria da resposta a desastres?
8. Classifique a qualidade da descrição do método aplicado para reprodução.

Para obter uma compreensão mais aprofundada dos artigos e gerar uma base de informações abrangente, foi realizada a terceira etapa do questionário, focada em perguntas descritivas que capturam os detalhes técnicos e contextuais:

Avaliação Descritiva:

1. Domínio do problema.
2. Quais métodos foram utilizados (exatos, meta-heurísticas, IA, combinação, outros)?
3. Qual o local do estudo de caso?
4. O conjunto de dados utilizado é uma instância real ou simulada?
5. Um breve resumo dos resultados.

Os dados extraídos foram analisados qualitativamente, permitindo uma síntese dos resultados e a identificação de padrões e tendências. A análise focou em como as diferentes abordagens e tecnologias foram aplicadas, os resultados alcançados e as recomendações para futuras pesquisas.

Os resultados da revisão foram discutidos em relação aos objetivos da pesquisa, destacando as principais contribuições das meta-heurísticas e algoritmos exatos na mitigação ou prevenção de alagamentos, as implicações das mudanças climáticas e a importância das tecnologias emergentes. Esse trabalho possibilita vislumbrar novos horizontes de pesquisa para evitar catástrofes climáticas, não só mitigando como também prevenindo esses eventos, minimizando o dano à população.

Esta abordagem metodológica estruturada permitiu uma análise abrangente e detalhada da literatura, fornecendo visões valiosas para a mitigação e prevenção de alagamentos ou enchentes.

3. Fundamentação Teórica

Nesta seção, seguindo o mapeamento sistemático realizado, revisamos a literatura relevante sobre a aplicação de técnicas para mitigação e prevenção de enchentes, organizando a discussão em domínios e métodos. Seguindo o trabalho de [Gupta et al., 2016], que propõe um “blueprint” arquitetural para a pesquisa em gestão de desastres, estruturamos nossa análise em categorias de domínios de problemas e métodos aplicados. Este mapeamento permite identificar lacunas e tendências na literatura, fornecendo uma base para futuras pesquisas.

Os autores revisaram a pesquisa em gestão de desastres em cinco atributos principais: função de gestão de desastres, momento do desastre, tipo de desastre, tipo de dados e técnica de análise de dados. Utilizando uma abordagem semelhante, classificamos os trabalhos em sete categorias distintas de domínios de problemas, conforme apresentado na Tabela 1. Adicionalmente, categorizamos os artigos de acordo com os métodos aplicados, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 1: Tabela de Domínios

Domínio	Qtd.	Artigos
Otimização de Evacuação e Planejamento de Roteamento	13	[Bakhshian e Martinez-Pastor, 2024], [Yazdani e Haghani, 2023], [Vatyukova et al., 2023], [Biswas et al., 2022], [Dubois et al., 2022], [Rottondi et al., 2021], [Zhu et al., 2019], [Khederzadeh e Zandi, 2019], [Gama et al., 2016], [Wang et al., 2016], [Pillac et al., 2016], [Bell et al., 2014], [Bretschneider e Kimms, 2012]
Gestão de Desastres e Logística Humanitária	13	[Khalili-Fard et al., 2024], [Biswas et al., 2022], [Khorsi et al., 2022], [Nayeri et al., 2022], [Singh et al., 2021], [Abazari et al., 2021], [Rottondi et al., 2021], [Yang et al., 2020], [Nayeri et al., 2019], [Mohamadi et al., 2019], [Kazazi Darani e Bashiri, 2018], [Alem et al., 2016], [Bryson et al., 2002]
Previsão e Avaliação de Riscos de Desastres	7	[Liao et al., 2024], [Xu et al., 2024], [Roy et al., 2020a], [Mallick et al., 2021], [Roy et al., 2020b], [Pham et al., 2020], [Siegrist e Gutscher, 2008]
Otimização de Cadeia de Suprimentos	7	[Khalili-Fard et al., 2024], [Dehghan et al., 2021], [Abazari et al., 2021], [Yang et al., 2020], [Aslan e Çelik, 2019], [Javadian et al., 2017], [Alem et al., 2016]
Monitoramento e Previsão Ambiental	3	[Xu et al., 2024], [Ali Shatat et al., 2022], [Qian e Claudel, 2020]
Otimização de Redes de Transporte e Infraestrutura	6	[Noori et al., 2022], [Dubois et al., 2022], [Roy et al., 2020b], [Gama et al., 2016], [Bell et al., 2014], [Rajagopalan et al., 2008]
Aspectos Humanos e Psicologia em Desastres	3	[Yazdani e Haghani, 2023], [Mera e Balijepalli, 2020], [Siegrist e Gutscher, 2008]

Tabela 2: Tabela de Métodos

Método	Qtd.	Artigos
Combinações de Meta-heurísticas e Algoritmos Exatos	7	[Khalili-Fard et al., 2024], [Dehghan et al., 2021], [Aslan e Çelik, 2019], [Mohamadi et al., 2019], [Javadian et al., 2017], [Wang et al., 2016], [Bretschneider e Kimms, 2012]
Otimização Multiobjetivo e Meta-heurísticas	8	[Yazdani e Haghani, 2023], [Biswas et al., 2022], [Khorsi et al., 2022], [Nayeri et al., 2022], [Singh et al., 2021], [Mallick et al., 2021], [Zhu et al., 2019], [Nayeri et al., 2019]
Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina	6	[Liao et al., 2024], [Xu et al., 2024], [Roy et al., 2020a], [Mallick et al., 2021], [Roy et al., 2020b], [Pham et al., 2020]
Heurísticas e Algoritmos de Busca Local	6	[Vatyukova et al., 2023], [Rottondi et al., 2021], [Khederzadeh e Zandi, 2019], [Pillac et al., 2016], [Bell et al., 2014], [Bryson et al., 2002]
Programação Linear e Métodos Exatos	7	[Bakhshian e Martinez-Pastor, 2024], [Dubois et al., 2022], [Dehghan et al., 2021], [Yang et al., 2020], [Qian e Claudel, 2020], [Kazazi Darani e Bashiri, 2018], [Gama et al., 2016]
Métodos de Otimização Baseados em Redes	3	[Abazari et al., 2021], [Yang et al., 2020], [Alem et al., 2016]
Métodos Estatísticos e Análise de Dados	5	[Noori et al., 2022], [Ali Shatat et al., 2022], [Mera e Balijepalli, 2020], [Alem et al., 2016], [Siegrist e Gutscher, 2008]

4. Resultados

Avançaremos agora para realçar os elementos fundamentais dos estudos que se destacaram, alcançando as classificações mais elevadas no questionário qualitativo, evidenciando sua relevância e impacto na área.

Os estudos [Khalili-Fard et al., 2024] e [Mohamadi et al., 2019] destacam a colaboração entre ONGs e organizações humanitárias para otimizar o planejamento da cadeia de suprimentos em desastres, abordando a gestão de itens perecíveis e a importância das telecomunicações. Eles propõem modelos que lidam com incertezas e objetivos múltiplos, visando uma resposta rápida e a manutenção de comunicações eficazes durante emergências.

Os trabalhos [Wang et al., 2016] e [Bretschneider e Kimms, 2012] focam no planejamento de evacuação, com o uso de programação estocástica e modelos baseados em padrões para otimizar a evacuação em desastres urbanos. Eles são essenciais para a criação de planos de evacuação eficientes, reduzindo riscos e melhorando as operações de resgate em situações críticas.

O estudo [Biswas et al., 2022] e o artigo [Khorsi et al., 2022] exploram métodos inovadores de otimização para problemas de roteirização em cenários de desastres. O primeiro propõe um modelo multiobjetivo para cobrir cidades com eficiência, enquanto o segundo utiliza um algoritmo meta-heurístico de agrupamento para otimizar a entrega de ajuda humanitária, ambos visando maximizar a cobertura e a eficiência em situações críticas.

Por outro lado, o trabalho [Mallick et al., 2021] oferece uma abordagem avançada para avaliação de riscos de deslizamentos de terra, enquanto o estudo [Zhu et al., 2019] apresenta mo-

delos de roteirização de emergência que enfatizam a equidade e a prioridade no atendimento às vítimas. Ambos contribuem para a gestão de riscos e a eficácia das operações de socorro, aplicando tecnologias avançadas e considerações éticas no planejamento de respostas a desastres.

O artigo [Rest e Hirsch, 2022] utiliza Diagramas de Laços Causais e um Sistema de Suporte à Decisão baseado em Busca Tabu para otimizar serviços de saúde domiciliar durante desastres, como demonstrado na pandemia de COVID-19 em Viena. Já o estudo [Qian e Claudel, 2020] apresenta um algoritmo de agendamento de sensores em tempo real para monitoramento ambiental urbano, que melhora a eficiência na detecção e resposta a eventos como inundações repentinas. Enquanto o estudo [Pillac et al., 2016] desenvolve uma heurística eficiente para planejar rotas de evacuação, reduzindo significativamente o número de variáveis necessárias e permitindo soluções quase ótimas em tempo real para evacuações em massa.

A ênfase em artigos mais citados é frequentemente utilizada como um indicativo de relevância na comunidade científica. Os três artigos mais citados segundo o *Scopus*, na data deste trabalho, são: o artigo [Bretschneider e Kimms, 2012], já relacionado, com 331 citações; o artigo [Kazazi Darani e Bashiri, 2018], com 201 citações, que aborda a modelagem estocástica de redes para planejamento logístico e otimização de recursos em situações de emergência; e o artigo [Gupta et al., 2016], com 193 citações, que serviu como referência base para a pesquisa sistemática e classificação em domínios e métodos.

Os trabalhos mencionados representam a vanguarda da pesquisa em gestão de desastres, destacando-se por alcançar a nota máxima em todos os critérios avaliados neste estudo. Eles demonstram a eficácia das meta-heurísticas e algoritmos exatos na resolução de complexos problemas de alojamentos e enchentes. A aplicação dessas técnicas avançadas não apenas otimiza as soluções propostas, mas também contribui para uma compreensão mais profunda dos desafios enfrentados durante tais eventos catastróficos.

5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão abrangente que classificasse as aplicações de otimização para o problema das enchentes em macro domínios, proporcionando uma estrutura que possa auxiliar pesquisas futuras. Dada a importância do tempo de resposta em situações de emergência, a classificação coesa e coerente das abordagens recentes torna-se uma ferramenta adicional no combate a estes eventos. Através desta revisão, buscamos demonstrar quais métodos de otimização foram aplicados em situações de enchentes, oferecendo uma base para que futuras pesquisas possam responder aos desafios impostos por eventos climáticos hidrológicos extremos.

A revisão sistemática da literatura sobre técnicas de mitigação e prevenção de enchentes revela um espectro diversificado de estratégias, refletindo a complexidade inerente a esses fenômenos naturais. A integração de meta-heurísticas, algoritmos exatos e inteligência artificial ilustra a necessidade de soluções multidisciplinares e integradas. A adoção de heurísticas, algoritmos de busca local e métodos de otimização baseados em redes e análise estatística de dados ressalta a importância de uma abordagem holística na gestão de enchentes.

Contudo, os recentes eventos catastróficos no Rio Grande do Sul ressaltam a urgência de superar desafios persistentes, como a eficaz integração de abordagens diversas, a consideração de incertezas e a implementação prática de soluções em comunidades vulneráveis. A literatura científica oferece um arsenal de estratégias que podem ser decisivas na prevenção e mitigação de enchentes, transformando eventos potencialmente catastróficos em fenômenos gerenciáveis. Além disso, a integração de políticas públicas e a colaboração entre governos, empresas e comunidades são fundamentais para o desenvolvimento e execução de planos de emergência detalhados.

Finalmente, a construção do *dashboard* disponível no link (<https://github.com/augustompm/Mitigation-of-Extreme-Hydrological-Climatic-Events>) emerge como ferramenta adicional. Este painel não apenas facilita o acesso aos resultados obtidos nesta pesquisa, mas também destaca artigos por avaliação, o que aponta para diversas direções promissoras para futuras pesquisas.

Para trabalhos futuros, observa-se a importância do aprimoramento contínuo tanto dos domínios quanto dos métodos mapeados. É essencial revisitar essa classificação e expandi-la conforme novas abordagens ou técnicas forem surgindo. Além disso, uma possibilidade para futuras pesquisas é o desenvolvimento de um sistema não supervisionado que rotule novos trabalhos dentro dessas características, mantendo o estado da arte atualizado na computação para desastres naturais. Nesse contexto, a mineração de texto pode ser utilizada para recuperar artigos e atualizar o repositório de informações.

Referências

- Abazari, S. R., Aghsami, A., e Rabbani, M. (2021). Prepositioning and distributing relief items in humanitarian logistics with uncertain parameters. *Socio-Economic Planning Sciences*, 74.
- Alem, D., Clark, A., e Moreno, A. (2016). Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. *European Journal of Operational Research*, 255(1):187 – 206.
- Ali Shatat, A. S., Mobin Akhtar, M., Zamani, A. S., Dilshad, S., e Samdani, F. (2022). Big data driven map reduce framework for automated flood disaster detection based on heuristic-based ensemble learning. *Cybernetics and Systems*.
- Aslan, E. e Çelik, M. (2019). Pre-positioning of relief items under road/facility vulnerability with concurrent restoration and relief transportation. *IISE Transactions*, 51(8):847 – 868.
- Azevedo, A. L. (2024). Mudanças climáticas tornaram a tragédia no rio grande do sul duas vezes mais provável, indica estudo internacional. <https://oglobo.globo.com/brasil/noticia/2024/06/03/mudancas-climaticas-tornaram-a-tragedia-no-rio-grande-do-sul-duas-vezes-mais-provavel-indica-estudo-internacional.ghhtml>. Acessado: 2024-06-04.
- Bakhshian, E. e Martinez-Pastor, B. (2024). A multi-objective optimization model to minimize the evacuation time during a disaster considering reconstruction activity and uncertainty: A case study of cork city. *Transportation Engineering*, 16.
- Bell, M. G., Fonzone, A., e Polyzoni, C. (2014). Depot location in degradable transport networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 66:148 – 161.
- Biswas, A., Tripathy, S. P., e Pal, T. (2022). On multi-objective covering salesman problem. *Neural Computing and Applications*, 34(24):22127 – 22140. ISSN 09410643.
- Bretschneider, S. e Kimms, A. (2012). Pattern-based evacuation planning for urban areas. *European Journal of Operational Research*, 216(1):57 – 69.
- Bryson, K.-M., Millar, H., Joseph, A., e Mobolurin, A. (2002). Using formal ms/or modeling to support disaster recovery planning. *European Journal of Operational Research*, 141(3):679 – 688.

- Catto, A. (2024). Chuvas no rs: setor produtivo divulga primeiros balanços de prejuízos econômicos da tragédia. <https://g1.globo.com/economia/noticia/2024/05/12/chuva-s-no-rs-setor-produtivo-divulga-primeiros-balancos-de-prejuizos-economicos-da-tragedia.ghtml>. Acessado: 2024-06-01.
- Dehghan, M., Hejazi, S. R., Karimi-Mamaghan, M., Mohammadi, M., e Pirayesh, A. (2021). Capacitated location routing problem with simultaneous pickup and delivery under the risk of disruption. *RAIRO - Operations Research*, 55(3):1371 – 1390.
- Dubois, F., Renaud-Goud, P., e Stolf, P. (2022). Capacitated vehicle routing problem under deadlines: An application to flooding crisis. *IEEE Access*, 10:45629 – 45642.
- Gama, M., Santos, B. F., e Scaparra, M. P. (2016). A multi-period shelter location-allocation model with evacuation orders for flood disasters. *EURO Journal on Computational Optimization*, 4 (3-4):299 – 323.
- Gupta, S., Starr, M. K., Farahani, R. Z., e Matinrad, N. (2016). Disaster management from a pom perspective: Mapping a new domain. *Production and Operations Management*, 25(10):1611 – 1637.
- Javadian, N., Modarres, S., e Bozorgi, A. (2017). A bi-objective stochastic optimization model for humanitarian relief chain by using evolutionary algorithms. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 30(10):1526 – 1537.
- Kazazi Darani, S. e Bashiri, M. (2018). A multi-district asset protection problem with time windows for disaster management. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 31 (11):1929 – 1934.
- Khalili-Fard, A., Hashemi, M., Bakhshi, A., Yazdani, M., Jolai, F., e Aghsami, A. (2024). Integrated relief pre-positioning and procurement planning considering non-governmental organizations support and perishable relief items in a humanitarian supply chain network. *Omega (United Kingdom)*, 127.
- Khederzadeh, M. e Zandi, S. (2019). Enhancement of distribution system restoration capability in single/multiple faults by using microgrids as a resiliency resource. *IEEE Systems Journal*, 13(2): 1796 – 1803.
- Khorsi, M., Chaharsooghi, S. K., Husseinzadeh Kashan, A., e Bozorgi-Amiri, A. (2022). Solving the humanitarian multi-trip cumulative capacitated routing problem via a grouping metaheuristic algorithm. *Annals of Operations Research*, 319(1):173 – 210. ISSN 02545330.
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Joint Technical Report TR/SE-0401; 0400011T.1, Software Engineering Group, Department of Computer Science, Keele University; Empirical Software Engineering, National ICT Australia Ltd., Keele, Staffs, UK; Eversleigh, NSW, Australia. URL <http://barbara@cs.keele.ac.uk>.
- Liao, M., Wen, H., Yang, L., Wang, G., Xiang, X., e Liang, X. (2024). Improving the model robustness of flood hazard mapping based on hyperparameter optimization of random forest. *Expert Systems with Applications*, 241. ISSN 09574174.

- Mallick, J., Alqadhi, S., Talukdar, S., Alsubih, M., Ahmed, M., Khan, R. A., Kahla, N. B., e Abutayeh, S. M. (2021). Risk assessment of resources exposed to rainfall induced landslide with the development of gis and rs based ensemble metaheuristic machine learning algorithms. *Sustainability (Switzerland)*, 13(2):1 – 30.
- Mera, A. P. e Balijepalli, C. (2020). Towards improving resilience of cities: an optimisation approach to minimising vulnerability to disruption due to natural disasters under budgetary constraints. *Transportation*, 47(4):1809 – 1842.
- Mohamadi, A., Yaghoubi, S., e Pishvaei, M. S. (2019). Fuzzy multi-objective stochastic programming model for disaster relief logistics considering telecommunication infrastructures: a case study. *Operational Research*, 19(1):59 – 99.
- Nayeri, S., Asadi-Gangraj, E., e Emami, S. (2019). Metaheuristic algorithms to allocate and schedule of the rescue units in the natural disaster with fatigue effect. *Neural Computing and Applications*, 31(11):7517 – 7537.
- Nayeri, S., Sazvar, Z., e Heydari, J. (2022). A fuzzy robust planning model in the disaster management response phase under precedence constraints. *Operational Research*, 22(4):3571 – 3605.
- Noori, M. A. R., Sharma, B., e Mehra, R. (2022). Feature selection from disaster tweets using spark-based parallel meta-heuristic optimizers. *Social Network Analysis and Mining*, 12(1).
- Petró, G. (2024). Quaest: 99 <https://g1.globo.com/politica/noticia/2024/05/09/quaest-64percent-acreditam-que-tragedia-no-rs-tem-ligacao-com-as-mudancas-climaticas.ghtml>. Acessado: 2024-05-20.
- Pham, V. D., Nguyen, Q.-H., Nguyen, H.-D., Pham, V.-M., Vu, V. M., e Bui, Q.-T. (2020). Convolutional neural network - optimized moth flame algorithm for shallow landslide susceptible analysis. *IEEE Access*, 8:32727 – 32736.
- Pillac, V., Van Hentenryck, P., e Even, C. (2016). A conflict-based path-generation heuristic for evacuation planning. *Transportation Research Part B: Methodological*, 83:136 – 150.
- Qian, K. e Claudel, C. (2020). Real-time mobile sensor management framework for city-scale environmental monitoring. *Journal of Computational Science*, 45.
- Rajagopalan, R., Mehrotra, K. G., Mohan, C. K., e Varshney, P. K. (2008). Hierarchical path computation approach for large graphs. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 44(2):427 – 440.
- Rest, K.-D. e Hirsch, P. (2022). Insights and decision support for home health care services in times of disasters. *Central European Journal of Operations Research*, 30(1):133 – 157.
- Rottondi, C., Malandrino, F., Bianco, A., Chiasserini, C. F., e Stavrakakis, I. (2021). Scheduling of emergency tasks for multiservice uavs in post-disaster scenarios. *Computer Networks*, 184.
- Roy, P., Chandra Pal, S., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., e Das, B. (2020a). Threats of climate and land use change on future flood susceptibility. *Journal of Cleaner Production*, 272.
- Roy, P., Chandra Pal, S., Chakraborty, R., Chowdhuri, I., Malik, S., e Das, B. (2020b). Threats of climate and land use change on future flood susceptibility. *Journal of Cleaner Production*, 272.

- Siegrist, M. e Gutscher, H. (2008). Natural hazards and motivation for mitigation behavior: People cannot predict the affect evoked by a severe flood. *Risk Analysis*, 28(3):771 – 778.
- Singh, S., Nandan, A. S., Malik, A., Kumar, N., e Barnawi, A. (2021). An energy-efficient modified metaheuristic inspired algorithm for disaster management system using wsns. *IEEE Sensors Journal*, 21(13):15398 – 15408.
- Tenente, L. (2024). Chuva no rs foi mais concentrada e intensa do que em cheia histórica de 1941, mostra levantamento. <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2024/05/11/chuva-no-rs-foi-mais-concentrada-e-intensa-do-que-em-cheia-historica-de-1941-mostra-levantamento.ghtml>. Acessado: 2024-05-24.
- Teófilo, S. (2024). Órgão do governo diz que alertou cidades do rs sobre risco de enchentes; prefeitos reclamam de falta de coordenação e estrutura. <https://oglobo.globo.com/brasil/sos-rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/14/orgao-do-governo-diz-que-alertou-cidades-do-rs-sobre-risco-de-enchentes-prefeitos-reclamam-de-falta-de-coordenacao-e-estrutura.ghtml>. Acessado: 2024-06-01.
- Vatyukova, O. Y., Klikunova, A. Y., Vasilchenko, A. A., Voronin, A. A., Khoperskov, A. V., e Kharitonov, M. A. (2023). The problem of effective evacuation of the population from flood-plains under threat of flooding: Algorithmic and software support with shortage of resources. *Computation*, 11(8).
- Wang, L., Yang, L., Gao, Z., Li, S., e Zhou, X. (2016). Evacuation planning for disaster responses: A stochastic programming framework. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 69:150 – 172.
- Xu, L., Zhang, X., Yu, H., Chen, Z., Du, W., e Chen, N. (2024). Incorporating spatial autocorrelation into deformable convlstm for hourly precipitation forecasting. *Computers and Geosciences*, 184.
- Yang, P., Xiao, Y., Zhang, Y., Zhou, S., Yang, J., e Xu, Y. (2020). The continuous maximal covering location problem in large-scale natural disaster rescue scenes. *Computers and Industrial Engineering*, 146.
- Yazdani, M. e Haghani, M. (2023). Elderly people evacuation planning in response to extreme flood events using optimisation-based decision-making systems: A case study in western sydney, australia. *Knowledge-Based Systems*, 274. ISSN 09507051.
- Zhu, L., Gong, Y., Xu, Y., e Gu, J. (2019). Emergency relief routing models for injured victims considering equity and priority. *Annals of Operations Research*, 283(1-2):1573 – 1606.