



APLICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA EM MAPEAMENTO DE INUNDAÇÕES EM REGIÕES COSTEIRAS – UMA REVISÃO DA LITERATURA

Giovanna Arroyo Jardim⁽¹⁾

Mestranda em Engenharia Hídrica – UNIFEI; Especialista em Gestão de Projetos – MBA USP; Engenheira Civil – Unesp Bauru

Bárbara Almeida Teixeira⁽²⁾

Mestranda em Engenharia Hídrica – UNIFEI; Engenheira Civil - UNIFEI

Ana Flávia Vieira Pontes de Moraes⁽³⁾

Doutora em Hidráulica e Saneamento – USP; Mestra em Hidráulica e Saneamento - USP; Engenheira Civil - USP

Ana Paula Moni Silva⁽⁴⁾

Doutora em Engenharia Mecânica - UNIFEI; Mestra em Engenharia da Energia – UNIFEI; Engenheira Hídrica - UNIFEI

Endereço⁽¹⁾: Rua Mauro Pinheiro, nº 120, apt. 73 (bloco Amalfi) – Vila Ferroviária - Araraquara – São Paulo - CEP: 14802-355 - Brasil – Tel.: +55 (16) 99702-2983 - e-mail: giovanna.arroyo.jardim@gmail.com.

RESUMO

As modelagens hidrológica e hidráulica desempenham um papel crucial na gestão de recursos hídricos, especialmente no contexto da prevenção e mitigação de inundações. Esses modelos permitem a análise do comportamento da água em diferentes cenários, fornecendo subsídios fundamentais para o planejamento urbano, a proteção de comunidades vulneráveis e a tomada de decisões informadas. Este artigo apresenta uma revisão sobre a aplicação de modelos de simulação hidrológica e hidráulica no mapeamento de inundações, destacando o papel das tecnologias de modelagem na compreensão e mitigação dos riscos. Ao reunir estudos sobre modelagens hidrológicas e hidráulicas, o trabalho analisa a eficácia de softwares amplamente usados, como HEC-HMS e HEC-RAS, além da integração dessas ferramentas com sistemas de informações geográficas (GIS), o que aprimora a precisão e aplicabilidade das simulações em ambientes urbanos e rurais. O artigo também explora abordagens que consideram a influência de marés, essenciais para regiões costeiras, e destaca como as inovações tecnológicas facilitam a criação de cenários que auxiliam no planejamento de medidas preventivas. Esta revisão reforça a relevância de estudos sobre inundações, dados os impactos econômicos e sociais significativos, e ressalta a contribuição dos modelos de simulação no desenvolvimento de soluções eficazes para a gestão de áreas vulneráveis.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidráulica, HEC-RAS, Marés.



INTRODUÇÃO

Um *review paper*, ou artigo de revisão de literatura, é um tipo de trabalho acadêmico que sintetiza e analisa criticamente estudos já publicados em uma determinada área de conhecimento, oferecendo uma visão abrangente sobre o tema e destacando tendências, lacunas e avanços na literatura científica (BAUMEISTER, R. F.; LEARY, M. R. 1997). Diferente dos artigos de pesquisa originais, que apresentam novos dados empíricos, o artigo de revisão organiza e interpreta achados de múltiplos estudos, auxiliando pesquisadores e profissionais a compreenderem o estado atual de conhecimento e identificar oportunidades para investigações futuras (GRANT, M. J.; BOOTH, 2009). Ao integrar resultados de várias pesquisas, os artigos de revisão contribuem para a construção de um corpo de conhecimento mais coeso e são especialmente valiosos em áreas complexas ou emergentes, como a modelagem hidrológica e hidráulica para o mapeamento de inundações, onde os métodos e as abordagens estão em constante evolução.

De acordo com NAGARAJAN, K.; et al. (2022), uma série de estudos aborda a utilização de softwares GIS, ferramentas de GIS e simulações hidrológicas e hidráulicas utilizando, respectivamente, HEC-HMS e HEC-RAS. No entanto, novos usuários destas tecnologias, que estão tendo contato pela primeira vez com os manuais e tutoriais dos softwares, podem ter dificuldade em encontrar as informações necessárias para desenvolver seus estudos. Considerando isso, o artigo de avalia estudos realizados entre 2000-2021 categorizando-os em: Métodos de Análise de Frequência de Inundações, Modelos Digitais de Elevação (DEM) e Softwares. O estudo também cita que o usuário pode ter dúvidas em relação à qual técnica aplicar para o caso em que deseja estudar as inundações. Portanto, justifica-se a importância do estudo de revisão da literatura de maneira clara e objetiva classificando os métodos utilizados e suas aplicações.

O trabalho de NAGARAJAN, K.; et al (2000) enfoca que as mudanças climáticas têm causado danos ao meio ambiente, entre eles o aumentos da frequência das inundações em vários países. Considerando a importância de avaliar as áreas sujeitas às inundações, o estudo reuniu diferentes metodologias e técnicas de mapeamento de enchente de acordo com a geografia de várias regiões do mundo ao longo das últimas duas décadas anteriores ao estudo. A pesquisa destaca que a utilização de técnicas de sensoriamento remoto e Sistema de Informação Geográfica (SIG) com auxílio de imagens de satélite vêm sendo utilizado juntamente com softwares consolidados de simulação hidrológica e hidráulica. O trabalho teve como objetivo reunir estudos já realizados e dividi-los em quatro seções: mapeamento de planície de inundações, método analítico, modelo digital de elevação e softwares utilizados. Observou-se que, globalmente, de acordo com as condições do local e do clima, o efeito das enchentes muda geograficamente e, como resultado, as abordagens e técnicas empregadas por diversos pesquisadores diferem de um local para outro e de acordo com os objetivos de sua pesquisa. Como consequência, lacunas foram identificadas, e os autores aplicaram estratégias para resolver seus problemas. Este documento serve como uma visão geral da revisão de literatura importante da pesquisa.

OBJETIVO

O objetivo deste artigo é realizar uma análise abrangente da literatura sobre o uso de modelos de simulação hidrológica e hidráulica para o mapeamento de inundações. A revisão visa compilar e examinar criticamente as principais metodologias, ferramentas e softwares empregados, como o HEC-HMS e o HEC-RAS, bem como a integração desses modelos com sistemas de informação geográfica (GIS). Além disso, o estudo aborda simulações que consideram a influência das marés, essenciais em regiões costeiras. Ao consolidar o conhecimento existente, este artigo busca identificar lacunas na literatura e ressaltar a importância desses modelos na formulação de estratégias para a prevenção e mitigação de desastres associados a inundações.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A bibliometria é uma técnica utilizada em pesquisas científicas que permite analisar as publicações existentes por meio de uma abordagem qualitativa (Guimarães, 2021). De acordo com a base de dados da *Scopus*, é possível analisar e estabelecer relações entre dados como ano de publicação, país de publicação, autor, instituição de pesquisa, tipo de documento científico, área de estudo e instituição financiadora.

A partir dos dados obtidos com a análise bibliométrica, é possível criar indicadores para medir a qualidade científica de um assunto, e até mesmo nortear os pesquisadores quanto à relevância de publicações existentes



para sua própria pesquisa, auxiliando no processo de tomada de decisão (Pimenta, 2017). Neste estudo, foi realizada Revisão Bibliométrica, conforme metodologia a seguir.

Escolha da base de dados

Portal Capes é um sistema que reúne diversas bases de dados em que podem ser buscados trabalhos científicos. Dentre as bases de dados disponíveis, foram escolhidas a *Scopus* e a Web of Science para iniciar a revisão bibliométrica deste tema.

Palavras chaves e Booleanos

A metodologia utilizada para a busca de trabalhos científicos nessas bases de dados consiste em utilizar strings de busca. As strings de busca consistem em palavras-chaves relacionadas ao tema pesquisado e operadores booleanos que expressem a relação entre as palavras.

Os operadores booleanos mais utilizados são:

- And que expressa relação de intersecção entre as palavras;
- Or que expressa relação de união entre as palavras; e
- And Not que expressa relação de exclusão entre as palavras.

Além dos operadores booleanos, pode-se utilizar aspas em uma palavra se desejar encontrar apenas este termo, ou asterisco na palavra se desejar encontrar sinônimos para este termo.

Strings de Busca

Para a revisão bibliométrica desta dissertação, levantou-se palavras relacionadas ao tema de modelagem de inundações em áreas costeiras e influência de marés. Palavras como “*tidal*”, “*modeling*”, “*flood*”, “*coastal*”, “*urban*”, “*HEC*” foram combinadas entre si para obtenção das strings de busca. Também foi utilizado o recurso do asterisco para obter sinônimos da palavra buscada.

Resultados strings

Na **Tabela 1** apresentadas as strings utilizadas no estudo e o resultado dos trabalhos encontrados em cada uma das bases de dados. A busca foi realizada em abril de 2024.

Tabela 1: Tabela Strings de busca

STRINGS DE BUSCA (PALAVRAS-CHAVE)	Nº de artigos	
	SCOPUS	WOS
<i>tidal*</i> AND <i>drainage*</i> AND <i>modeling*</i>	497	408
<i>coastal*</i> AND <i>hydrology*</i> AND <i>modeling*</i> AND <i>tidal*</i>	115	94
<i>flood*</i> AND <i>analysis*</i> AND <i>simulation*</i> AND <i>tidal*</i>	390	231
<i>flood*</i> AND <i>modeling*</i> AND <i>coastal*</i> AND <i>HEC</i>	81	56
<i>coastal*</i> AND <i>HEC</i>	155	231
<i>flood*</i> AND <i>model*</i> AND <i>tide*</i> AND <i>urban*</i>	232	217
<i>tidal*</i> AND <i>HEC</i>	93	143

Fonte: *Scopus*, acesso em abril de 2024

Escolha da string

A string utilizada para análise de dados foi “*coastal** AND *HEC*”, essa busca resultou em 155 documentos científicos na base *Scopus* e 231 documentos científicos na base Web of Science. A palavra “*coastal*” cuja tradução é costeira, engloba temas relacionados à área litorânea e a palavra “*HEC*” faz referência aos softwares HEC-HMS e HEC-RAS cuja aplicação é a realização de modelagens hidrológicas e hidráulicas, respectivamente.



Análise dos dados da string

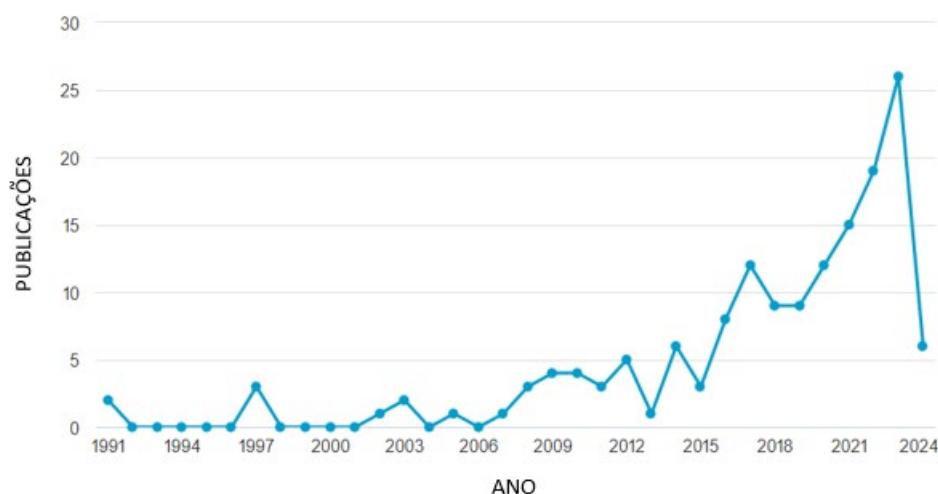
Com a escolha da *string* de busca, foi possível realizar a análise dos dados das publicações existentes na base de dados *Scopus*. Esta plataforma foi escolhida pela vantagem de possuir uma ferramenta denominada “analyze results” com a qual é possível analisar as características das publicações buscadas, conforme é feito a seguir. Além disso, o número de resultados obtido para a *string* procurada que resultou em 155 documentos é satisfatório para as análises estatísticas que serão realizadas na sequência e, filtrando documentos mais relevantes, também se tem um bom número de documentos para realização do estado da arte do tema.

Na **Figura 1**, tem-se a análise de documentos publicados por ano. Observa-se que o número de publicações se manteve baixo até o ano de 2018, e a partir deste ano houve um aumento nas publicações anuais. As publicações terem um aumento nos anos mais recentes se justifica pois o tema está relacionado com modelagem computacional que é um estudo recente. Esse crescimento pode também estar relacionado à intensificação dos eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas, que têm exigido maior atenção da comunidade científica sobre a vulnerabilidade das áreas costeiras. O aumento nas publicações pode indicar uma resposta da academia à necessidade de aprimorar as ferramentas de simulação e planejamento urbano frente aos impactos das marés, tempestades e inundações.

Na **Figura 2**, tem-se a análise de documentos publicados por área de estudo. Observa-se que a maioria dos documentos está relacionada com a área de “Meio Ambiente” (35,6% dos documentos), seguido da área de “Ciências da Terra” (18,9% dos documentos), e pela área de “Engenharia” (17,8% dos documentos). Também se observa documentos relacionados com a área de “Agricultura e Ciências Biológicas” (8,7% dos documentos), estes não possuem tanta relação com o tema desta pesquisa. A predominância das áreas de Meio Ambiente, Ciências da Terra e Engenharia demonstra o caráter multidisciplinar da modelagem de inundações costeiras, que envolve desde os aspectos físicos do sistema natural até o desenvolvimento de soluções técnicas para mitigação de riscos. Essa distribuição reforça que o tema é transversal e integra diferentes campos do conhecimento.

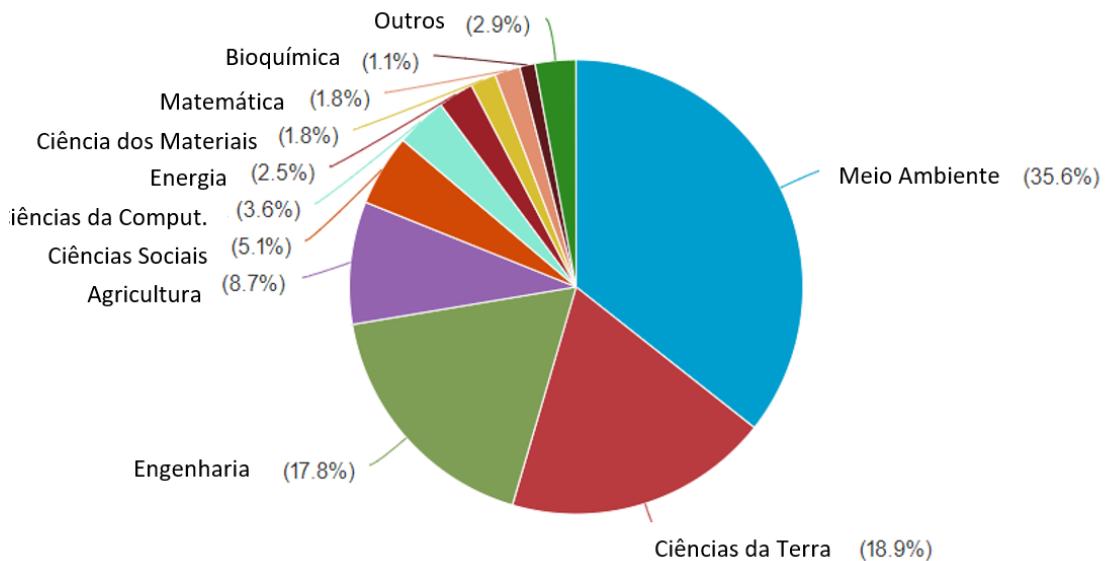
Na **Figura 3**, tem-se a análise de documentos por país ou território. Observa-se que a grande maioria dos estudos se concentra nos Estados Unidos, Índia e Irã. Dentre os 15 países que mais publicaram sobre o assunto, o Brasil ocupa o sétimo lugar. Isso indica que, embora o Brasil ainda não lidere em número de publicações, tem uma participação relevante no cenário internacional. Vale destacar que os países que mais publicam sobre o tema geralmente enfrentam desafios significativos relacionados a eventos hidrológicos extremos ou possuem forte tradição em modelagem ambiental, o que justifica seu destaque. A posição do Brasil também aponta para uma oportunidade de crescimento, especialmente considerando sua extensa faixa litorânea e as recorrentes inundações urbanas em áreas costeiras.

Figura 1: Publicações por ano – string: coastal* AND HEC



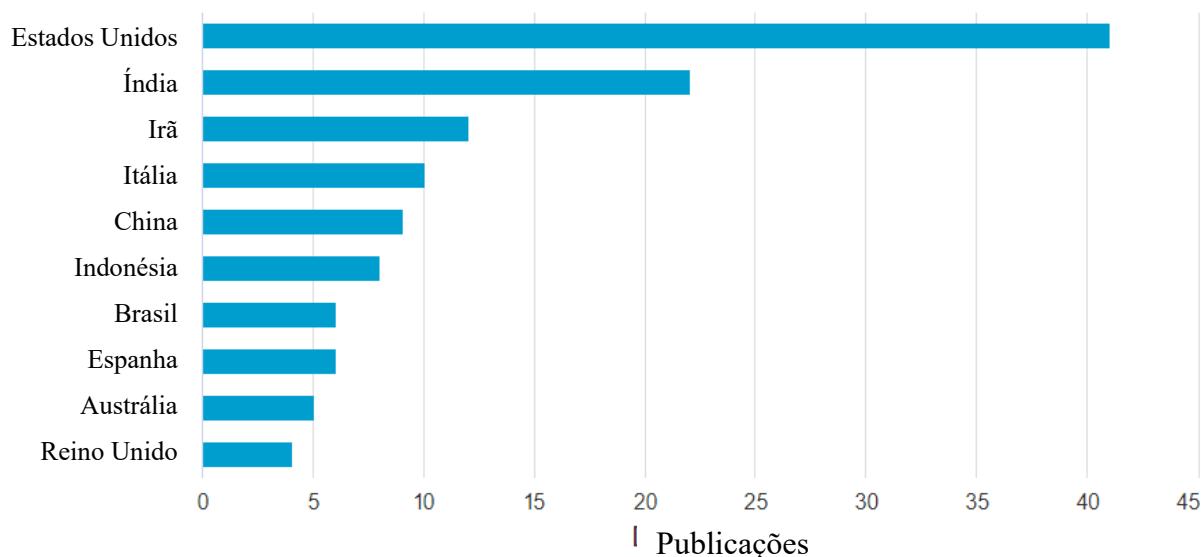
Fonte: *Scopus*, acesso em abril de 2024

Figura 2: Publicações por área – string: coastal* AND HEC



Fonte: Scopus, acesso em abril de 2024

Figura 3: Publicações por país – string: coastal* AND HEC

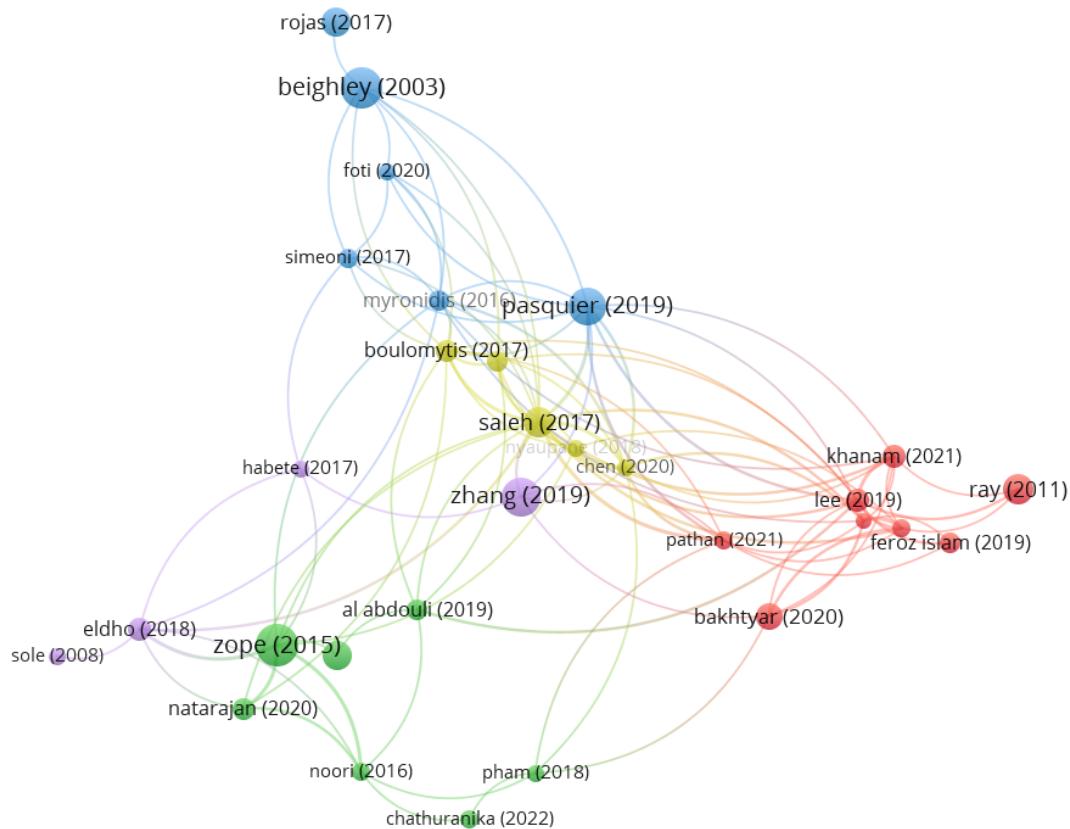


Fonte: Scopus, acesso em abril de 2024

A **Figura 4**, apresenta o acoplamento bibliográfico por autores que foi obtido por meio do software VOSviewer a partir dos dados da base *Scopus* para a *string* escolhida. O acoplamento bibliográfico estabelece relação entre documentos que possuem as mesmas citações. Na **Figura 4**, a ligação entre os documentos é dada pelos traços, cores e proximidades entre os círculos. Cada cor representa um “cluster”, ou seja, um grupo de documentos cuja relação entre si é maior.

A relação entre o acoplamento bibliográfico dos autores pode se dar pela proximidade geográfica, visto que o tema dos documentos muitas vezes está relacionado à simulação de uma região específica. Esse tipo de análise evidencia a existência de redes de colaboração científica e possíveis núcleos de pesquisa consolidados. A identificação desses clusters pode ser útil para futuros pesquisadores que buscam integrar comunidades científicas internacionais ou identificar líderes e instituições de destaque na área.

Figura 4: Acoplamento Bibliográfico de autores



Na **Figura 5**, é apresentada a nuvem de palavras, obtida por meio do software RStudio a partir dos dados da base *Scopus* para a *string* escolhida. Além das palavras utilizadas na *string* de busca, observa-se a frequência das palavras relacionadas a enchente e modelagem hidrodinâmica. Entretanto, estas são palavras que abrangem diversos tipos de estudo portanto. conclui-se que a *string* de busca escolhida foi adequada por permitir um maior filtro nos resultados de documentos encontrados e que se assemelham com o tema proposto para a dissertação. A nuvem de palavras reforça que a escolha da *string* capturou termos diretamente ligados à abordagem hidrológica/hidráulica do problema, como “*flood*”, “*hydrodynamic*” e “*simulation*”. No entanto, a ausência de termos relacionados a impactos sociais ou vulnerabilidade aponta uma possível lacuna: os estudos analisados tendem a se concentrar na técnica de modelagem em si, com menor enfoque nas dimensões sociais ou na aplicação dos modelos em políticas públicas.

Figura 5: Nuvem de Palavras



ESTADO DA ARTE

Neste tópico, serão apresentados os artigos que, a partir da *string* de busca utilizada, foram selecionados como relevantes para o tema proposto na dissertação e que irão compor o Estado da Arte da pesquisa. Os artigos foram divididos em quatro tópicos relacionados com: Modelagem Hidrológica, Modelagem Hidráulica, Integração de simulação com ferramentas Gis, Influência das Marés.

Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica desempenha um papel essencial no estudo de inundações, pois permite a análise do ciclo hidrológico e o comportamento das bacias hidrográficas sob diferentes condições climáticas e de uso do solo. Por meio da modelagem hidrológica, é possível estimar a vazão de escoamento superficial, infiltração no solo e outros processos-chave que influenciam a quantidade e a velocidade da água durante eventos de precipitação intensa. Esses modelos são fundamentais para prever a resposta hidrológica de uma região, proporcionando subsídios para o desenvolvimento de estratégias de mitigação de inundações.

A utilização de softwares especializados, como o HEC-HMS, permite que sejam aplicadas diferentes metodologias, desde a simulação de eventos extremos até a análise de cenários com variações de parâmetros hidrológicos, o que aprimora a compreensão dos riscos de inundação e sua gestão.

NATARAJAN, S. e RADHAKRISHNAN, N. (2009) abordam que as inundações são eventos traumáticos com possibilidade de atingir bacias metropolitanas ao redor do mundo. Suas consequências trazem efeitos negativos à população, podendo inclusive causar mortes. Os efeitos das inundações podem ser mitigados utilizando técnicas de gestão adequadas, avaliando prever os riscos das inundações e realizar o planejamento de evacuações em regiões mais críticas. A pesquisa teve como objetivo uma simulação de modelo chuva-vazão aplicada para cidade no Sul da Índia em evento de pico ocorrido em 1999.

No estudo, foi utilizado o software HEC-HMS para auxiliar no modelo hidrológico. Inicialmente, foi avaliado o modelo digital de elevação gerado por meio do Sistema de Informação Geográfica (SIG), e escolhido o método Soil Conservation Service (SCS). A vazão de pico e o volume do modelo foram comparados aos valores típicos de Nash-Sutcliffe, referente a uma métrica amplamente utilizada para avaliar a precisão de modelos hidrológicos, comparando resultados simulados com valores reais observados. O coeficiente de Nash-Sutcliffe varia de infinito negativo a 1, sendo valores mais próximos de 1 aqueles com menor erro. A curva IDF (Intensidade-Duração-Frequência) foi escolhido como o melhor modelo para gerar o pico de enchente e o volume para diferentes períodos de retorno na bacia, pois apresentou um valor de Nash de 0,7, superior ao valor produzido pelo procedimento de hietograma especificado.



Modelagem Hidráulica

A modelagem hidráulica é fundamental para avaliar a dinâmica do fluxo de água em sistemas naturais e construídos, sendo essencial no mapeamento de inundações e na análise de comportamentos em canais, rios, e sistemas de drenagem. Ao reproduzir as características do escoamento da água, como profundidade, velocidade e pressão, a modelagem hidráulica possibilita uma compreensão detalhada dos padrões de inundaçao e dos pontos de acúmulo de água, especialmente em áreas urbanas e regiões vulneráveis a eventos extremos. Com o uso de ferramentas como o HEC-RAS, torna-se viável simular cenários diversos, incluindo alterações na infraestrutura e respostas do sistema a diferentes condições de escoamento.

Esses modelos oferecem suporte crucial para a tomada de decisões em projetos de prevenção de desastres e na adaptação de estruturas hidráulicas, contribuindo para a formulação de medidas eficazes de mitigação de inundações.

O estudo de PEREIRA, C. E.; et al. (2017) aborda uma comparação entre modelos simplificados utilizados para estimar área inundada c, Causada por cheias geradas pela ruptura de barragens e os resultados obtidos para essa mesma simulação utilizando o software HEC-RAS.

Segundo o estudo, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), classifica as barragens com base no critério de risco e dano potencial associado ao volume do reservatório. No caso de barragens de alto dano potencial, é necessário que os empreendedores avaliem as consequências relacionadas à ruptura da barragem. Portanto, é importante avaliar os modelos utilizados na estimativa de áreas inundadas causadas por cheias de ruptura de barragens.

Há uma série de modelos numéricos hidrológicos e hidráulicos, sejam eles unidimensionais ou bidimensionais, utilizados na análise da onda de cheia gerada pela ruptura de barragens. De modo geral, são modelos validados com dados reais de simulações em laboratório. Também estão disponíveis softwares de simulação acessíveis para a comunidade técnica e científica, como é o caso do HEC-RAS.

Como resultado da pesquisa de, concluiu-se que em termos de área de inundaçao os resultados do modelo simplificado e do modelo utilizando o software HEC-RAS foram idênticos. Entretanto, o amortecimento da onda de cheia ocorreu de forma menos acentuada utilizando o software do que os modelos simplificados. O autor ressalta que a utilização dos modelos simplificados pressupõe uma série de simplificações e, em geral, obtém-se resultados a favor da segurança, ou seja, estima-se valores de vazão e áreas inundadas maiores do que modelos de mais complexidade. Também ressalta que o resultado da comparação entre os modelos, resultando em área de inundaçao idêntica entre os modelos simplificados e o HEC-RAS foi avaliado para este estudo específico, e para outras configurações de barragem é necessária a mesma avaliação.

O estudo de LAMICHHANE, N. e SHARMA, S. (2018) avalia a imprecisão associada a dados de entrada no mapeamento de áreas de inundaçao utilizando o software de modelagem hidráulica HEC-RAS, o estudo avalia imprecisões advindas de dados de elevação e dos valores adotados para o coeficiente de rugosidade. Para a análise, foi avaliada uma bacia em Grand River, Ohio (EUA), e os resultados obtidos por LiDAR foram comparados com os resultados obtidos de um Modelo Digital de Elevação (MDE) de 10 metros de resolução. O estudo concluiu que é possível utilizar o MDE de 10 metros na área do canal sem grandes prejuízos, mas é aconselhável utilizado o modelo LiDAR na planície de inundaçao. Além disso, a rugosidade foi considerada um dado de entrada mais sensível no canal do que na planície de inundaçao.

Em relação aos modelos utilizados no terreno para simulações hidrológicas, NANDAM, V. e PATEL, P. L, (2024) fizeram um estudo de comparação de diversos Modelos Digitais de Elevação (MDE's), avaliando a precisão de cada um deles na sua utilização para modelagem de inundações urbanas. Como objetivo específico, foi avaliada a precisão vertical dos MDE's, utilizando conjunto de dados de medição de campo e foi avaliada a adequação desses MDE's na modelagem de inundações.

A região do estudo foi a Bacia do Tapi Inferior, localizada na planície costeira da Índia e foi simulado evento de cheia de 25,8 m³/s ocorrido no ano de 2006. Segundo o estudo, inundações são problemas recorrentes que afetam as populações de todo o mundo e, especialmente, a ocorrência simultânea de inundações ribeirinhas e eventos de aumento de nível do mar são críticos em regiões costeiras, destacando a necessidade de mapas precisos de inundaçao costeira e avaliação de riscos. Neste sentido, os levantamentos topográficos ou levantamentos por LiDAR desempenham um papel importante na confecção de mapas confiáveis para risco de inundaçao, entretanto nem todas as áreas possuem esses dados disponíveis.



No entanto, para os casos de escassez de dados, os Modelos Digitais de Elevação de acesso livre são alternativas viáveis, no entanto, é necessário avaliar a presença de erros observacionais que não podem ser negligenciados, e se necessários corrigidos para a análise dos dados. Foram comparados os MDE's SRTM, CartoDEM, AW3D30, TanDEM-X, MERIT, COPDEM30 e FABDEM. O menor erro observado em relação à cota de inundaçao foi para MDE FaBDEM, e o menor erro relacionado a extensão de inundaçao foi para o MDE TanDEM-X (NANDAM, V.; PATEL, P. L, 2024).

O estudo de FAROOQ, M.; et al. (2019) aborda que além de medidas estruturais para controle de inundações, a avaliação do risco de inundaçao e alerta de enchentes são técnicas muito utilizadas de medidas não estruturais. O estudo avalia o comportamento do Rio Swat, no Norte do Paquistão, que é uma região com histórico de inundações e teve um evento crítico registrado no ano de 2010. A pesquisa teve como objetivo simular trecho de 60 quilômetros ao longo do Rio Swat utilizando modelo HEC-RAS 2D e um modelo digital de elevação de 12 metros de resolução (WorldDEM). O modelo foi simulado para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Para calibrar o modelo, foi utilizado os dados da inundaçao observada em 2010 e o parâmetro utilizado para calibração foi o coeficiente de *manning*. A partir dos resultados obtidos na simulação utilizando o WorldDEM foram criados mapas de risco de inundaçao e observou-se que a região de agricultura de pomares foi a que majoritariamente estava inserida nas áreas de risco. Também foi concluído a partir da análise que a área de inundaçao aumenta linearmente com o aumento dos períodos de retorno, recomendou-se aplicar o mesmo estudo em modelo acoplado 1D/2D no HEC-RAS visto que se dispõe das seções transversais do rio para a área do estudo.

O estudo de PATEL, D.P.; et al. (2017) teve como objetivo realizar uma simulação com modelagem hidrodinâmica 1D/2D utilizando o software HEC-RAS para avaliar as áreas de inundaçao em região litorânea na cidade de Surat, na Índia. Tal região sofreu um evento crítico de 2006 que gerou um pico de descarga de cerca de 26.000 m³/s através da Barragem Ukai. Para a realização da simulação, foram consideradas 299 seções transversais ao longo do rio principal, cinco pontes e duas estruturas hidráulicas na modelagem 1D. Foi utilizado MDE SRTM de 30m e 90m de resolução para representação do terreno. O nível de saída da Barragem de Ukai foi considerado como condições de contorno de montante do modelo, enquanto os níveis de maré na foz do rio foram considerados como condições de contorno de jusante do modelo. Os resultados, utilizando dados históricos, demonstraram que ao longo do ano de 2006 o dia 09 de agosto foi o mais crítico em termos de áreas inundadas na cidade de Surat e demonstrou que as principais zonas da cidade estão seguras contra inundações para vazões de saída da Barragem Ukai de até 14.430 m³/s.

CHEN, Y.; et.al (2020) analisaram como o pulso natural de inundações mantém ecossistemas de rios e planícies de inundaçao, promovendo o intercâmbio de recursos de água doce entre o leito principal do rio e seus habitats de planície. Poucos estudos anteriores quantificaram como as vazões afetam as planícies de inundaçao, como na estimativa da área inundada, volumes de água da inundaçao e conectividade dos canais. O modelamento de planícies aluviais geralmente se baseia na relação entre altura de estágio de fluxo e os níveis de vazão registrados em estações fluviométricas.

Para este estudo, foram comparados o modelo de elevação relativa (MER) e o modelo HEC-RAS 1D utilizando dados de eventos de 2015 e 2016 no Rio Apalachicola, na Flórida, considerando uma gama de vazões do percentil 1 ao 99. Como os modelos digitais de elevação (DEM) a partir de dados de LiDAR apresentam limitações quanto à topografia do leito do rio, foram analisados um MDE baseado apenas em LiDAR e outro com dados combinados de LiDAR e sonar.

Os pesquisadores também compararam as estimativas do REM e HEC-RAS com mapas baseados em índices de água e vegetação derivados de imagens Landsat. Descobriram uma relação não linear entre a área inundada e o fluxo: o aumento da área é significativo até o percentil de vazão 90, e depois disso os aumentos são mínimos. As estimativas de inundaçao do REM e HEC-RAS foram semelhantes em todos os níveis de vazão selecionados, exceto no percentil 74, em que o REM apresentou uma área inundada 11% maior. Em níveis de vazão próximos ao mediano, grandes canais estavam totalmente conectados com áreas alagadiças e manchas baixas. Em vazões mais altas, apenas algumas estruturas antropogênicas permaneciam expostas.



As estimativas de inundação das imagens Landsat foram menos eficazes, identificando apenas 9% e 41% da área alagada, dependendo do índice usado, devido à limitação de penetração nas florestas densas e ao tamanho dos pixels que não captam os canais mais estreitos da planície de inundação. O DEM combinado de LiDAR e sonar gerou uma estimativa maior de volume de água no modelo HEC-RAS em comparação ao DEM apenas com LiDAR.

Observou-se ainda que o modelo subestima a extensão histórica de inundação da planície, pois o alargamento do canal principal pelo U.S. Corps of Engineers desde 1941 reduziu a conectividade natural entre o rio e a planície. Além disso, a frequência de períodos de seca e baixas vazões aumentou devido ao uso variado da água na bacia hidrográfica, o que diminuiu a extensão de inundações comparado ao passado.

Este estudo ressalta a importância dos fluxos altos frequentes para manter a conectividade entre o rio e a planície de inundação e os ecossistemas florestais associados, servindo de base para decisões de gestão de água e da planície, bem como para pesquisas futuras.

Integração de simulação com ferramenta GIS

De acordo com o estudo de CABRAL, S. L.; et al. (2016), a integração entre modelos de simulação hidrológica e hidráulica e ferramentas de SIG possibilita desenvolver uma metodologia de simulação confiável em bacias urbanas, representando de forma satisfatória análises de manchas de inundação. O estudo também afirma que tal integração entre os modelos e as ferramentas de SIG é um objeto de gestão para órgãos governamentais no monitoramento de desastres naturais, podendo auxiliar na mitigação do efeito destes eventos.

De acordo com MENDES, T. A.; et al. (2022), a integração de ferramentas SIG, e de levantamentos LiDAR podem promover modelagem hidrodinâmicas em softwares como o HEC-RAS com o objetivo de analisar potenciais áreas de inundação urbana. Segundo o estudo, a modelagem permite identificar os trechos inundáveis de forma prática para diferentes cenários de precipitação.

ACKERMAN, C. T.; et al. (2009) abordam funcionalidades recentes do software HEC-RAS, segundo o estudo, o HEC-RAS é muito utilizado no cálculo de cotas de inundação seguido de processamento em softwares de GIS para avaliação da extensão de inundação. Entretanto, nova ferramenta de delimitação de planícies de inundação no próprio HEC-RAS é capaz de gerar mapas de inundação considerando dados de entrada de modelo de superfície terrestre. A ferramenta permite um refinamento mais acelerado do modelo hidráulico se comparado ao modelo de duas etapas em que a visualização é realizada com o uso de GIS.

A pesquisa de ABDESSAMED, D.; ABDERRAZAK, B. (2019) representa um estudo de caso da Bacia Hidrográfica de Ain Sefra, localizada no Sudoeste da Argélia, que engloba áreas totalmente urbanizadas e que frequentemente estão suscetíveis a inundações, causando perdas econômicas e humanas. A abordagem metodológica da pesquisa utilizou o software HEC-HMS para a modelagem hidrológica da bacia combinado com o software HEC-RAS para modelagem hidráulica da bacia, também foram utilizados o modelo Watershed Modeling System e o Sistema de Informação Geográfica (SIG) para visualização dos resultados. O objetivo foi analisar o comportamento das inundações na região urbanizada da cidade de Ain Sefra durante eventos extremos, considerando cenários com e sem a utilização de muros de contenção construídos pelas autoridades locais para retenção do volume d'água. Foram simulados para os períodos de retorno de 10, 100 e 1000 anos. A partir dos resultados, foi possível concluir que a presença do muro de contenção reduziu os danos causados por enchentes na área de estudo, entretanto quanto maior o período de retorno menor foi a capacidade de retenção dos muros construídos, já que maior era a vazão de contribuição. O estudo também concluiu que a região central da cidade é a mais afetada pelos eventos de cheia, e representa uma primeira contribuição ao estudo de enchentes desta bacia hidrográfica, os autores sugerem pesquisas adicionais considerando transporte de sedimento nos modelos numéricos e alternativas de mitigação das inundações.

Influência da Maré

A influência das marés é um fator crítico nas simulações hidráulicas para o mapeamento de inundações, especialmente em regiões costeiras e áreas próximas a estuários, onde o nível do mar e as variações de maré impactam diretamente o comportamento dos rios e sistemas de drenagem. As marés podem agravar a extensão e a intensidade das inundações, dificultando o escoamento das águas fluviais e potencializando o risco de alagamentos em períodos de maré alta, particularmente quando combinados com eventos de chuvas intensas.



A modelagem que incorpora essas variações permite uma análise mais realista e precisa dos cenários de inundação, considerando tanto a influência das marés quanto as condições hidrológicas. Dessa forma, os modelos que simulam a interação entre águas fluviais e marítimas fornecem informações essenciais para o planejamento urbano e a gestão de riscos em áreas costeiras vulneráveis, contribuindo para a implementação de soluções de mitigação e adaptação mais eficazes.

A dissertação de LEITE (2023) aborda a necessidade de avaliar o impacto do aumento no nível do mar na elaboração de Planos Diretores de Macrodrrenagem, que por sua vez, são uma importante ferramenta de gestão pública frente à problemas causados por inundações. Nesta pesquisa, foi realizado um estudo de caso em região litorânea do Espírito Santo com a utilização do software SOBEK.

O SOBEK é um software pago que desenvolvido pela empresa holandesa Deltares (1977) e é formado por uma série de módulos aplicáveis à simulação do comportamento de águas fluviais em áreas rurais ou urbanas. No Brasil, tem-se a aplicação deste software no Plano Diretor de Macrodrrenagem do Alto Tietê – PDMAT e no Plano Diretor de Águas Urbanas da Região Metropolitana de Vitória -PDAU-RMGV (LEITE, 2023).

Os Planos Diretores de Macrodrrenagem são regidos pelo “TERMO DE REFERÊNCIA PARA ELABORAÇÃO DE PLANO DIRETOR DE ÁGUAS PLUVIAIS URBANAS” (BRASIL, 2011), o documento tem o objetivo de orientar a execução de estudos e projetos a serem elaborados para minimizar os impactos das cheias (LEITE, 2023).

Entretanto, o estudo de LEITE (2023) identifica que há um gargalo no Termo de Referência para Elaboração de Plano Diretor de Águas Pluviais Urbanas, pois os projetos de macrodrrenagem realizados em zonas costeiras possuem variável de grande impacto que não existe nos projetos de regiões continentais, a maré.

No caso do estudo de LEITE (2023), o modelo hidrodinâmico realizado com o software SOBEK permitiu a comparação das manchas de inundação sem a consideração da maré e com a consideração da maré, verificando o quanto o aumento do nível do mar ocasiona aumento da área inundada e da altura média da lâmina d’água.

De acordo com o estudo de SANTIAGO-COLLAZO, F. L.; et al. (2019), as inundações costeiras extremas apresentam ameaça significativa à vida humana e a infraestrutura das cidades. Isso porque as bacias costeiras de baixa declividade pode ser submetidas a um evento de chuva extrema e de maré alta ao mesmo tempo. Dada a importância a avaliação destes eventos, a pesquisa tem como objetivo uma revisão dos estudos mais recentes que quantificam as inundações utilizando modelo de inundação composta. Este modelo é assim definido pois pode consistir em diferentes modelos numéricos, dados observados e uma combinação desses elementos. O estudo traz as definições, vantagens e limitações de cada técnica com o objetivo de nortear futuras pesquisas. As conclusões do estudo apontam que futuras pesquisas devem se concentrar no desenvolvimento de um acoplamento rigoroso entre os modelos e que possa representar com precisão as interações físicas entre maré alta e vazão gerada pela área interiorana.

Uma ferramenta de previsão de inundação híbrida mais precisa pode ajudar tomadores de decisão, partes interessadas e autoridades a convergir para melhores medidas de resiliência costeira, que podem potencialmente salvar vidas humanas, auxiliar no projeto de estruturas e comunidades, e reduzir danos materiais (SANTIAGO-COLLAZO, F. L.; et al., 2019).

Eventos extremos de precipitação intensa combinados com marés elevadas são fontes significativas de preocupação para a gestão de inundação em áreas costeiras. As mudanças climáticas têm causado um aumento no nível do mar, exercendo maior pressão sobre essas localidades já vulneráveis. Sabendo disso, é necessária uma compreensão mais aprofundada acerca das implicações dos riscos combinados de marés elevadas com eventos de cheia e recentes avanços computacionais em modelagem hidráulica permitem a oportunidade de avaliar esses riscos e apoiar a tomada de decisão (PASQUIER, U.; et al., 2019).

O estudo de PASQUIER, U.; et al. (2019) utilizou recursos do HEC-RAS para desenvolver um modelo hidrodinâmico integrado 1D-2D para avaliar a inundação em área costeira do Reino Unido. A abordagem 1D-2D proporcionou uma representação mais detalhada da inundação em áreas urbanas costeiras, permitindo também capturar interações com áreas interiores com maior predominância de inundações fluviais. Embora a inundação tenha sido impulsionada principalmente pelo aumento do nível do mar, eventos combinados ampliaram a área inundada em 5 a 40% e a profundidade média em 10 a 32%, afetando diferentes locais



dependendo do cenário. Os resultados destacam a importância de estratégias que considerem fontes de inundaçao diferentes, como a fluvial e a marítima, em regiões costeiras.

A pesquisa de HUANG, H.; et al. (2023) examinou como pequenas bacias hidrográficas respondem a enchentes em um cenário de mudanças climáticas e de uso do solo, com foco específico na bacia do Rio Yonghe, em Guangzhou, China.

As pequenas bacias são mais vulneráveis a alterações nos fatores que causam inundações em comparação com grandes bacias, mas até então, a maioria dos estudos tem se concentrado em grandes bacias, cujas conclusões nem sempre podem ser aplicadas diretamente às menores C.

Em maio de 2020, a bacia do Rio Yonghe foi afetada por uma inundaçao severa causada por múltiplos fatores. Para entender melhor como a bacia responde a esses eventos, os pesquisadores desenvolveram e calibraram um modelo hidrodinâmico que combina o HEC-HMS e o HEC-RAS, com base nas profundidades de inundaçao observadas durante esse evento. O estudo analisou diferentes cenários, mostrando que a bacia do Rio Yonghe é predominantemente influenciada pelo rio, mas que os efeitos da maré e das mudanças no uso do solo têm um impacto mais intenso quando as marés são em níveis altos e as mudanças no uso do solo ocorrem de forma abrupta, enquanto a intensidade da chuva tem uma resposta mais linear. Os resultados reforçam a importância de considerar os efeitos das marés no gerenciamento de enchentes, mesmo em bacias costeiras dominadas por rios, e sugerem que, em pequenas bacias, a presença de até 50% de área impermeável indica uma necessidade urgente de implementar medidas de controle de inundações HUANG, H.; et al. (2023).

A pesquisa de MUÑOZ, D.F.; et al. (2022) analisa o papel dos modelos hidrodinâmicos na simulação de marés, que integra fatores como o fluxo de rios, maré, ressacas, ventos e ondas, essenciais para representar a dinâmica de inundações em áreas costeiras. A escolha de um modelo bidimensional (2D) adequado, que consiga integrar interações entre rios, estuários e dinâmicas oceânicas, é fundamental para prever com precisão o NTA e auxiliar agências e partes interessadas na tomada de decisões e em respostas emergenciais para inundações.

Neste estudo, são comparados o desempenho de dois modelos hidrodinâmicos amplamente utilizados, o 2D HEC-RAS e o Delft3D-Flexible Mesh (FM), na capacidade de prever as marés na Baía de Delaware, nos Estados Unidos. Utilizando uma configuração de modelo previamente estabelecida, os pesquisadores simularam os efeitos dos furacões Sandy e Isabel, que causaram grandes danos na região. Foram realizadas análises das marés, comparando o nível total da água observado e simulado, além de variações espaço-temporais das marés partir de simulações baseadas em cenários.

Os resultados mostram que a entrada de dados atmosféricos no Delft3D-FM melhora significativamente as previsões de NTA em comparação com o 2D HEC-RAS. Além disso, as simulações no Delft3D-FM podem ser até 6 a 10 vezes mais rápidas que no 2D HEC-RAS. Entretanto, o 2D HEC-RAS (versão 5.07), por ser um software não comercial e mais fácil de implementar, é uma alternativa simples para modelar eventos extremos quando a influência atmosférica não é tão relevante no domínio do modelo.

NONES, M.; et. al (2020) utilizaram um modelo numérico unidimensional (1D) para simular condições hidromorfodinâmicas em um canal ramificado do Delta do Rio Pô, na Itália, durante uma enchente ocorrida na primavera de 2009. Modelos 1D são tradicionalmente aplicados para simular a hidrodinâmica fluvial em áreas ribeirinhas a montante da influência das marés, onde o fluxo é predominantemente unidirecional. No entanto, eles também podem ser úteis para regiões de transição fluvial-marinha, especialmente em eventos de descarga elevada, fornecendo uma visão geral que pode orientar modelagens mais detalhadas.

Nesta aplicação, o modelo HEC-RAS 1D foi configurado com dados de batimetria e de composição granulométrica obtidos em campo, enquanto a dimensão da pluma fluvial no delta foi estimada a partir de uma imagem MODIS capturada no pico da enchente. A comparação dos resultados numéricos com dados reais mostrou que o modelo 1D foi eficaz em representar a dinâmica do delta em larga escala e em identificar locais onde estudos mais detalhados poderiam ser necessários.



O modelo também conseguiu reproduzir adequadamente as condições hidromorfodinâmicas do canal e os dados sedimentológicos obtidos de uma amostra de sedimento retirada a alguns quilômetros da costa durante o evento de inundação. Além disso, uma análise de sensibilidade revelou que o tamanho da pluma fluvial pode influenciar a evolução do prodelta, enquanto seu impacto em áreas internas é pequeno, já que as pressões principais são geradas pela alta vazão do rio durante o evento de cheia.

Esses resultados reforçam a utilidade dos modelos 1D em estudos de larga escala para regiões de delta, especialmente como ferramenta preliminar que aponta áreas para análises mais detalhadas.

A partir da análise dos artigos apresentados neste tópico, é possível identificar algumas lacunas ainda existentes na pesquisa científica relacionada à modelagem de inundações em áreas costeiras. Um dos principais pontos observados é a baixa ocorrência de estudos que realizam o acoplamento completo entre modelagem hidrológica e hidráulica considerando explicitamente a influência das marés em ambientes urbanos. Embora existam estudos que abordem esses componentes de forma isolada, são raros aqueles que integram as variáveis de forma conjunta em um mesmo modelo, o que é essencial para simulações mais realistas em regiões costeiras vulneráveis.

Além disso, observa-se que muitos estudos estão voltados para a análise de eventos passados, sem incorporar projeções de mudanças climáticas ou cenários futuros de uso e ocupação do solo. A ausência dessa abordagem dificulta a aplicação dos modelos como ferramenta de suporte ao planejamento urbano e à gestão de riscos. Também se nota uma limitação quanto à disponibilidade de dados topográficos de alta resolução (como LiDAR), especialmente em áreas onde esses levantamentos não foram realizados, o que compromete a precisão dos modelos hidráulicos.

Dessa forma, constata-se a necessidade de pesquisas futuras que proponham metodologias integradas de modelagem, que considerem simultaneamente diferentes fatores de risco (chuva intensa, maré alta, urbanização) e que explorem alternativas viáveis para regiões com restrição de dados. Estudos que associem a modelagem técnica a ferramentas de planejamento urbano, considerando aspectos socioeconômicos e medidas de adaptação, também representam uma oportunidade importante para avançar na aplicação prática dos modelos em regiões costeiras.

DISCUSSÃO

A revisão da literatura destacou que o uso de modelos de simulação hidrológica e hidráulica, como o HEC-HMS e HEC-RAS, juntamente com ferramentas de GIS, é essencial para o mapeamento preciso de inundações. Estes modelos fornecem suporte robusto para simulações de cenários de precipitação e escoamento em áreas urbanas e rurais, promovendo um melhor planejamento de ações de mitigação e resposta a desastres. Em regiões costeiras, a consideração da influência das marés mostrou-se indispensável para simulações mais realistas. Estudos como o de Pasquier et al. (2019) demonstraram que a elevação do nível do mar e as marés podem aumentar significativamente a extensão das áreas alagadas em eventos de precipitação combinada, reforçando a necessidade de acoplamento entre modelos fluviais e marítimos para capturar essas interações complexas.

No entanto, a revisão também revelou lacunas, como a falta de modelos padronizados para integração de marés em bacias hidrográficas menores e carentes de dados, onde a variação nas respostas a eventos de cheia e maré alta é particularmente sensível a mudanças no uso do solo e variabilidade climática (HUANG, H.; et al. 2023). Além disso, estudos adicionais podem ser necessários para abordar os efeitos da sedimentação e as limitações dos modelos em diferentes resoluções espaciais, como observado por LAMICHHANE, N. e SHARMA, S. (2018), e para desenvolver metodologias de modelagem que considerem de forma mais precisa a dinâmica das planícies de inundação em interação com fluxos fluviais e marítimos. Esses desafios ressaltam a importância de aprimorar e expandir as simulações para aumentar a precisão dos mapeamentos de inundação e adaptar as estratégias de gestão de áreas vulneráveis.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABDESSAMED, D.; ABDERRAZAK, B. *Coupling HEC-RAS and HEC-HMS in rainfall-runoff modeling and evaluating floodplain inundation maps in arid environments: case study of Ain Sefra city, Ksour Mountain. SW of Algeria. Environmental Earth Sciences*, v. 78, n. 19, 2019
2. ACKERMAN, C. T.; JENSEN, M. R.; BRUNNER, G. W. *New floodplain delineation capabilities in HEC-RAS. Proceedings of World Environmental and Water Resources Congress 2009 - World Environmental and Water Resources Congress 2009: Great Rivers*, v. 342, p. 2873–2879, 2009.
3. BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. *Termo de referência para elaboração de plano diretor de águas pluviais urbanas – diretrizes e parâmetros*. [S.l.]: [s.n.], 2011.
4. BAUMEISTER, R. F.; LEARY, M. R. *Writing narrative literature reviews. Review of General Psychology*, 1(3), 311–320, 1997.
5. CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. S.; TEIXEIRA, F. A. A. *Integração do sig, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: Aplicação à bacia do rio granjeiro-ce. Geociências*, v. 35, n. 1, p. 90–101, 2016.
6. CHEN, Y.; MOSSA, J.; SINGH, K. K. *Floodplain response to varied flows in a large coastal plain river. Geomorphology*, v. 354, 2020.
7. FAROOQ, M.; SHAFIQUE, M.; KHATTAK, M. S. *Flood hazard assessment and mapping of River Swat using HEC-RAS 2D model and high-resolution 12-m TanDEM-X DEM (WorldDEM)*. *Natural Hazards*, v. 97, n. 2, p. 477–492, 2019.
8. GRANT, M. J.; BOOTH, A. *A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. Health Information & Libraries Journal*, 26(2), 91–108, 2009.
9. HUANG, H.; PAN, Y.; WANG, C.; WANG, X. *Nonlinear Flood Responses to Tide Level and Land Cover Changes in Small Watersheds. Land*, v. 12, n. 9, 2023.
10. LAMICHHANE, N.; SHARMA, S. *Effect of input data in hydraulic modeling for flood warning systems. Hydrological Sciences Journal*, v. 63, n. 6, p. 938–956, 2018.
11. LEITE, P. A. C. Análise do impacto do aumento do nível do mar em um sistema de macrodrenagem no Espírito Santo. *Itajubá*, 2023. Dissertação de mestrado-Universidade Federal de Itajubá, 2023.
12. MENDES, T. A.; SOUSA, M. B.; PEREIRA, S. A. S.; SANTOS, K. A.; FORMIGA, K. T. M. *Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas*. p. 141–157, 2022.
13. MUÑOZ, D. F. et al. *Inter-Model Comparison of Delft3D-FM and 2D HEC-RAS for Total Water Level Prediction in Coastal to Inland Transition Zones. Journal of the American Water Resources Association*, v. 58, n. 1, p. 34–49, 2022.
14. NAGARAJAN, K.; NARWADE, R. P.; PATHAK, H.; PANHALKAR, S. S.; KULKARNI, V. S.; HINGMIRE, A. P. *Review Paper for floodplain mapping with applications of HEC-HMS, HEC-RAS and ArcGIS softwares - A Remote Sensing and GIS Approach. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, v. 9, n. 6, p. 812–826, 2022.
15. NAGARAJAN, K.; NARWADE, R. P.; PANHALKAR, S. S.; KULKARNI, V. S.; HINGMIRE, A. P.; NAIR, A. P. *Employing Digital Elevation Model (DEM) for Floodplain mapping with applications of HEC-HMS, HEC-RAS, and ArcGIS: A Review*. 13(2), p. 1-16, 2000.
16. NANDAM, V.; PATEL, P. L. *A framework to assess suitability of global digital elevation models for hydrodynamic modelling in data scarce regions. Journal of Hydrology*, v. 630, 2024.
17. NATARAJAN, S.; RADHAKRISHNAN, N. *Simulation of extreme event-based rainfall-runoff process of an urban catchment area using HEC-HMS. Modeling Earth Systems and Environment*, v. 5, n. 4, p. 1867–1881, 2019.
18. NONES, M.; MASELLI, V.; VARRANI, A.. *Numerical modeling of the hydro-morphodynamics of a distributary channel of the po river delta (Italy) during the spring 2009 flood event. Geosciences (Switzerland)*, v. 10, n. 6, p. 1–13, 2020.



19. PASQUIER, U.; HOOTON, Y. H.; GOULDEN, M.; HISCOCK, K. M. *An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change*. *Natural Hazards*, v. 98, n. 3, p. 915–937, 2019.
20. PATEL, D. P.; RAMIREZ, J. A.; SRIVASTAVA, P. K.; BRAY, M.; HAN, D. *Assessment of flood inundation mapping of Surat city by coupled 1D/2D hydrodynamic modeling: a case application of the new HEC-RAS 5*. *Natural Hazards*, v. 89, n. 1, p. 93–130, 2017.
21. PEREIRA, C. E.; VISEU, T.; MELO, J. F.; MARTING, T. N.; SALLA, M. R.; MOTA, K. R. R. *Comparação entre modelos simplificados e o modelo HEC-RAS no estudo de áreas de inundaçāo para o caso de Minas Gerais, Brasil*. *Revista Recursos Hídricos*, v. 38, n. 1, p. 75–90, 2017.
22. SANTIAGO-COLLAZO, F. L.; BILSKIE, M. V.; HAGEN, S. C. *A comprehensive review of compound inundation models in low-gradient coastal watersheds*. *Environmental Modelling and Software*, v. 119, n. 787, p. 166–181, 2019.