

MODELAGEM BIDIMENSIONAL DE INUNDAÇÕES NA BACIA DO RIO FRAGOSO EM UMA ÁREA COSTEIRA ALTAMENTE URBANIZADA COM INFLUÊNCIA DAS MARÉS

TWO-DIMENSIONAL MODELING OF FLOODING IN FRAGOSO RIVER FLOODPLAIN IN A HIGHLY URBANIZED COASTAL AREA WITH TIDAL INFLUENCE

MODELIZACIÓN BIDIMENSIONAL DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO FRAGOSO EN UNA ZONA COSTERA ALTAMENTE URBANIZADA CON INFLUENCIA DE MAREA

// RESUMO

AUTOR

Arivânia Bandeira Rodrigues 

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO (UFPE)

E-MAIL

arivania.rodrigues@ufpe.br

DATA DE SUBMISSÃO: 16/ 05/23

DATA DE APROVAÇÃO: 24/ 06/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.76153



E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB A MESMA LICENÇA.

Este estudo analisa as inundações recorrentes na Bacia Hidrográfica do Rio Fragoso (BHF), localizada na cidade de Olinda, Pernambuco, em uma região costeira de baixa altitude, alta densidade populacional e intensa urbanização. Esta pesquisa se destaca por incorporar a modelagem hidrológica e hidrodinâmica bidimensional considerando a influência das marés, oferecendo uma abordagem mais integrada para a análise de eventos extremos. Utilizando os softwares PCSWMM e HEC-RAS, foram simulados diferentes cenários de precipitação para avaliar os impactos das obras de canalização do rio. Os resultados indicam que as inundações na BHF estão associadas a fatores como elevada taxa de impermeabilização, influência de marés, baixo gradiente hidráulico e ocupação desordenada, que restringem a capacidade de escoamento do rio. Mesmo com a conclusão das obras de canalização, áreas significativas permanecerão vulneráveis a alagamentos devido a questões estruturais e problemas como assoreamento e acúmulo de resíduos. O estudo reforça a necessidade de estratégias complementares, como monitoramento contínuo, controle da ocupação do solo e medidas de adaptação às mudanças climáticas, visando minimizar os impactos das inundações e melhorar a resiliência urbana.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica. PE3D. LiDAR. controle de inundação. rio Fragoso-PE.

// ABSTRACT

This study analyzes recurrent flooding in the Fragoso River Basin (FRB), located in the city of Olinda, Pernambuco, in a coastal region with low altitude, high population density, and intense urbanization. This research stands out for incorporating two-dimensional hydrological and hydrodynamic modeling considering the influence of tides, offering a more integrated approach to the analysis of extreme events. Using the PCSWMM and HEC-RAS software, different precipitation scenarios were simulated to evaluate the impacts of the river channeling works. The results indicate that flooding in the FRB is associated with factors such as high impermeability rate, influence of tides, low hydraulic gradient, and disorderly occupation, which restrict the river's flow capacity. Even with the completion of the channeling works, significant areas will remain vulnerable to flooding due to structural issues and problems such as siltation and accumulation of waste. The study reinforces the need for complementary strategies, such as continuous monitoring, land use control, and climate change adaptation measures, aiming to minimize the impacts of floods and improve urban resilience.

Keywords: hydrodynamic modeling. PE3D. LiDAR. flood control. Fragoso-PE river.

// RESUMEN

Este estudio analiza las inundaciones recurrentes en la Cuenca del Río Fragoso (CHF), ubicada en la ciudad de Olinda, Pernambuco, en una región costera de baja altitud, alta densidad poblacional e intensa urbanización. Esta investigación se destaca por incorporar modelación hidrológica e hidrodinámica bidimensional considerando la influencia de las mareas, ofreciendo un enfoque más integrado al análisis de eventos extremos. Utilizando el software PCSWMM y HEC-RAS, se simuló diferentes escenarios de precipitación para evaluar los impactos de las obras de canalización del río. Los resultados indican que las inundaciones en el CHF están asociadas a factores como alta impermeabilidad, influencia de las mareas, bajo gradiente hidráulico y ocupación desordenada, que restringen la capacidad de caudal del río. Incluso con la finalización de las obras de canalización, importantes zonas seguirán siendo vulnerables a inundaciones debido a problemas estructurales y problemas como la sedimentación y la acumulación de residuos. El estudio refuerza la necesidad de estrategias complementarias, como el monitoreo continuo, el control del uso del suelo y las medidas de adaptación al cambio climático, con el objetivo de minimizar los impactos de las inundaciones y mejorar la resiliencia urbana.

Palabra Clave: modelado hidrodinámico. PE3D. LiDAR. control de inundaciones. río Fragoso-PE.

INTRODUÇÃO

Com a ocorrência frequente de precipitações de intensidade elevadas, e a maior concentração da população e bens nas áreas urbanas, desastres de inundação devastadores ocorrem com frequência em todo o mundo. Há preocupações de que os danos das inundações prejudiquem o desenvolvimento econômico, ameacem a sustentabilidade das comunidades locais e afetem negativamente as cadeias de abastecimento e, portanto, as atividades econômicas globais (Itagaki et al, 2021).

As mudanças climáticas têm sido amplamente reconhecidas como um fator significativo na intensificação de eventos climáticos extremos, incluindo inundações. A elevação do nível do mar, exacerba a vulnerabilidade das regiões costeiras a inundações, especialmente durante eventos de precipitação intensa e marés altas (Pasquier et al, 2018; Muis et al, 2016). Estes impactos são ainda mais preocupantes em áreas urbanas, com destaque para as áreas situadas em zonas costeiras, devido ao impacto combinado de marés altas e precipitações intensas (Shen et al, 2019, Lian et al, 2017), aumentando significativamente os riscos para infraestruturas críticas e populações locais (Khanam et al, 2021; Marsooli et al, 2019).

De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), num cenário mundial, os riscos climáticos, baseados em precipitações extremas e inundações costeiras, já são de moderado a alto, apresentando um alto índice de confiança na incerteza das previsões, alertando que durante as próximas duas décadas, as sociedades humanas enfrentarão uma série de riscos climáticos inevitáveis (IPCC, 2021).

Em regiões costeiras, a gestão de inundações enfrenta desafios adicionais devido à interação complexa entre os níveis de água fluvial e costeira. Estudos demonstram que a elevação do nível do mar pode não apenas aumentar a extensão das áreas inundadas, mas também a profundidade das inundações, afetando de maneira desproporcional áreas urbanas densamente povoadas (Marsooli et al, 2019; Kirkpatrick et al, 2020).

Os desastres naturais causados por inundações já estão entre os eventos mais prejudiciais em termos de perdas sociais e econômicas, tanto em países da Europa como também na China, Estados Unidos, Mianmar, Filipinas, Paquistão, Irã, Arábia Saudita, Egito e Venezuela (Elkhrachy et al, 2021). Por exemplo, na cidade de Haikou, na China, uma combinação de chuvas intensas e níveis elevados de maré foi identificada como a principal causa de inundações em diferentes distritos de drenagem (Lian et al, 2017). De maneira semelhante, na região do Delta do Mekong no Vietnã, as marés oceânicas têm um papel predominante nas elevações do nível da água, mesmo em locais distantes da foz do rio, exacerbando as inundações durante a estação chuvosa (Takagi et al, 2015).

Até o ano de 2050 estimam-se prejuízos econômicos da ordem de US\$ 940 milhões de perdas médias anuais caso o nível do mar se eleve 20 cm nas 22 maiores cidades costeiras da América Latina e Caribe, ultrapassando mais de US\$ 1 bilhão no caso de subida de 40 cm do nível do mar (Adams et al., 2014). Além disso, o estudo realizado por Kulp & Strauss em 2019,

usou dados revisados de elevação costeira e descobriu que a quantidade de pessoas ameaçadas pelo aumento do nível do mar projetado e inundações costeiras em 2100 pode ser três vezes maior do que as estimativas anteriores (Kulp & Strauss, 2019).

A previsão e a gestão de inundações em áreas costeiras devem considerar aplicação de modelos numéricos e técnicas de geoinformação, ferramentas essenciais para simular e prever os impactos das inundações, permitindo a implementação de estratégias de mitigação mais eficazes (Eldho et al, 2018).

A aplicação de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão é fundamental para compreender a relação entre a precipitação e o escoamento de água na bacia hidrográfica. Esses modelos consideram fatores como a distribuição espacial da precipitação, perdas por evaporação, infiltração, percolação, água subterrânea, escoamento superficial e subsuperficial, permitindo uma representação detalhada da bacia. Além disso, os modelos hidrodinâmicos são capazes de reproduzir o comportamento da propagação da vazão ao longo do corpo hídrico e prever a extensão de inundações. Essa previsão é essencial para a proteção de pessoas e propriedades (Santos, 2009).

Assim, a modelagem hidrológica e hidrodinâmica emerge como ferramenta essencial para a gestão pública e a formulação de estratégias de mitigação de riscos. A capacidade de simular e prever o comportamento dos sistemas hídricos permite uma gestão mais eficiente e sustentável, fornecendo dados cruciais para a tomada de decisões informadas (Dountcheva et al, 2023).

Modelos avançados, como o software PCSWMM, HEC-RAS, permitem simular cenários de inundação sob diferentes condições climáticas e de elevação do nível do mar, fornecendo dados cruciais para a tomada de decisões (Khanam et al, 2021; Pasquier et al, 2018). Os modelos são capazes de integrar múltiplas fontes de inundação, como fluviais, costeiras e de maré, oferecendo uma visão abrangente das dinâmicas de inundação em áreas costeiras (Tang et al, 2023). Além disso, a integração de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos pode melhorar significativamente a compreensão dos processos em grandes bacias hidrográficas e seus impactos em ecossistemas (Munar et al, 2018).

Portanto, a integração de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos avançados é crucial para prever e gerenciar os riscos de inundações em um contexto de mudanças climáticas. A capacidade de simular cenários futuros e avaliar a eficácia de diferentes estratégias de gestão pode ajudar a proteger comunidades vulneráveis e a desenvolver infraestruturas resilientes (Sadler et al, 2020; Tang et al, 2023).

Em regiões como o Nordeste brasileiro, caracterizadas por baixa altitude e alta impermeabilização do solo, os riscos associados a inundações tornam-se ainda mais significativos. A bacia hidrográfica do Rio Fragoso (BHF), situada em Olinda, Pernambuco, é um exemplo dessa vulnerabilidade. O rio Fragoso no seu baixo trecho ocupa uma planície costeira de cotas muito baixas sofrendo o efeito das marés, baixo gradiente hidráulico, lençol freático elevado e alta taxa de impermeabilização do solo que tornam a área altamente suscetível a inundações recorrentes. Esses fatores tornam a modelagem hidrológica e hidrodinâmica uma ferramenta indispensável para a previsão de cenários futuros e a formulação de estratégias eficazes de manejo de águas pluviais e mitigação de riscos.

Apesar dos avanços na modelagem hidrodinâmica e na previsão de inundações, muitos estudos sobre áreas costeiras urbanizadas negligenciam a influência simultânea das marés e do rápido avanço da urbanização sobre a dinâmica de inundação. Estudos como Pasquier et al. (2018) e Marsooli et al. (2019) enfatizam a importância de considerar a elevação do nível do mar e eventos climáticos extremos, mas poucos abordam a interação entre esses fatores e as obras de infraestrutura em andamento. Além disso, a literatura sobre modelagem bidimensional aplicada a bacias costeiras urbanizadas tem mostrado que as simulações auxiliam na avaliação e previsão de condições de inundações, auxiliando em estratégias de mitigação, tornando este estudo relevante para preencher essa lacuna e fornecer subsídios técnicos para o planejamento urbano e gestão dos riscos (Wenchao et al., 2021; Gomes et al., 2021; Fava et al., 2020; Paz et al., 2016).

Portanto, este artigo visa explorar o uso integrado dos softwares PCSWMM e HEC-RAS para modelar as dinâmicas hidrológicas e hidrodinâmicas na BHF sob diferentes cenários. Os resultados esperados visam subsidiar a gestão pública na implementação de soluções resilientes e na redução dos impactos das inundações, contribuindo para a segurança das comunidades costeiras e a sustentabilidade dos ecossistemas locais.

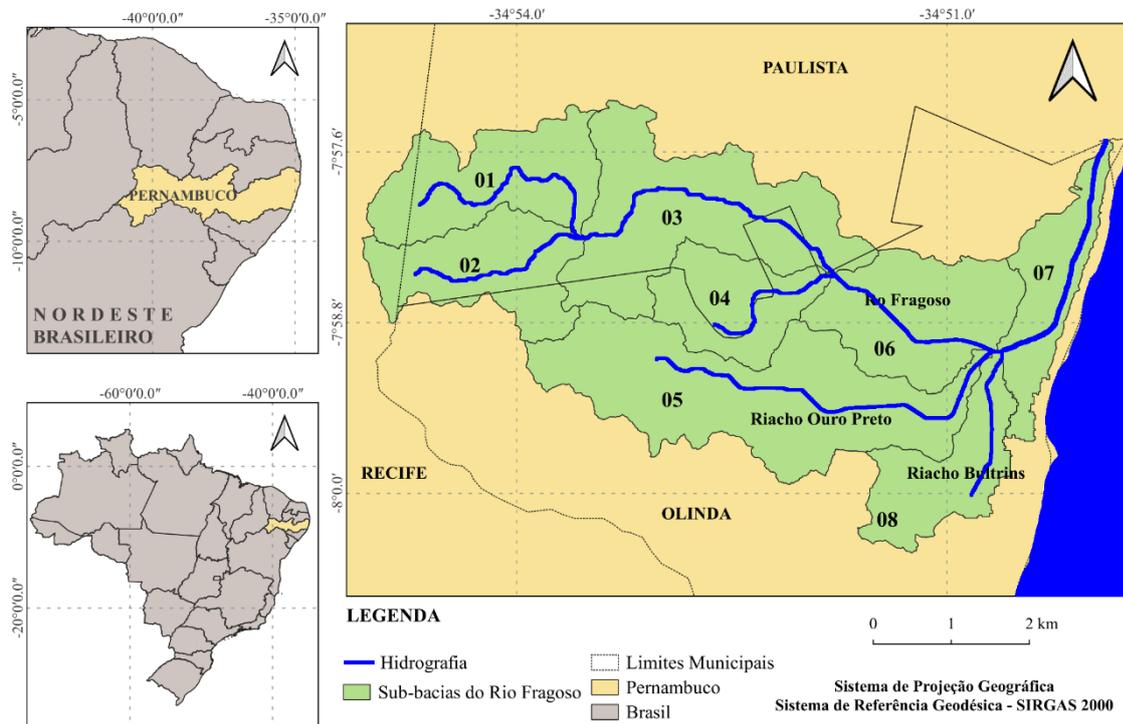
METODOLOGIA

Descrição da área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica do rio Fragoso, que se encontra inserida na Mesorregião Metropolitana do Recife, na Unidade de Planejamento Hídrico UP-14, GL1 do grupo dos pequenos rios litorâneos, no litoral norte do Estado de Pernambuco, Brasil. Situa-se, em maior parte, no município de Olinda, com ocupação de 62% e uma outra parte menor, nos municípios de Paulista e Recife, com ocupação de 35% e 3%, respectivamente. O rio Fragoso tem comprimento de cerca de 14,7 km, desde a nascente até a sua desembocadura em um estuário em conjunto com o rio Paratibe (Fonseca Neto, 2020).

A BHF possui área de contribuição de 28,6 km² e população estimada de 268 mil habitantes. Os principais afluentes são: riacho Ouro Preto e riacho Bultrins, como pode ser observado na Figura 1. O rio Fragoso no trecho da planície está sofrendo uma grande intervenção com alargamento e aprofundamento da calha bem como concretagem do fundo e dos lados. Neste trecho das intervenções está sendo chamado de Canal do Fragoso.

Figura 1. Localização da Bacia do rio Fragoso em Olinda – PE.

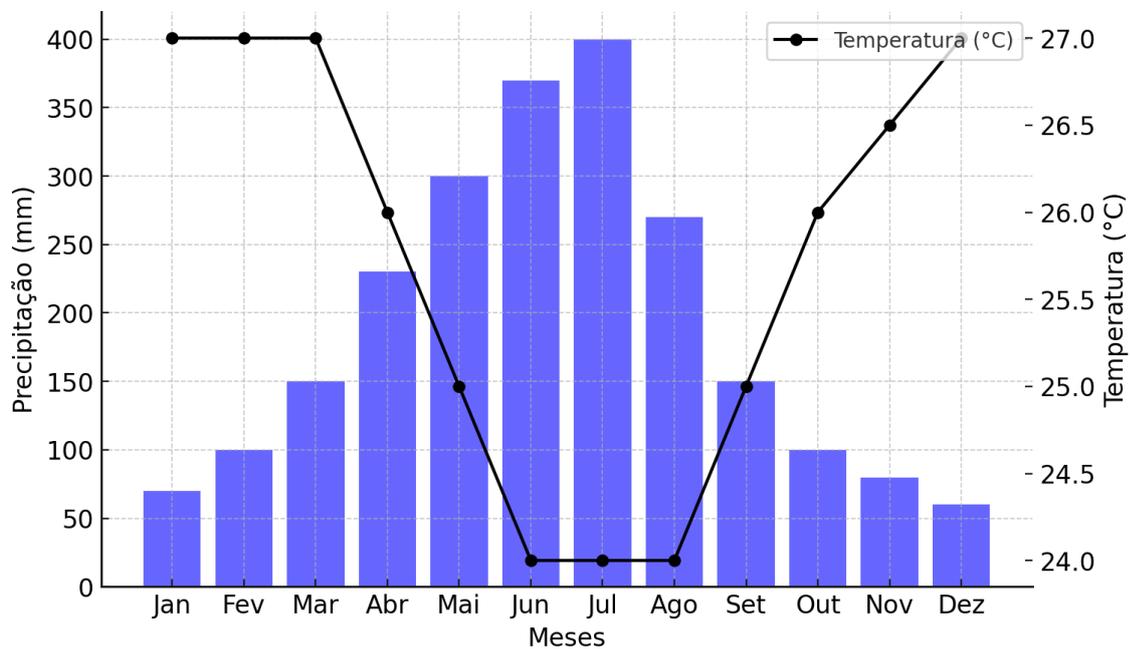


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do IBGE (2020).

O rio Fragoso deságua no rio Paratibe, a poucos metros da sua foz, com influência da maré, sugerindo por Novaes (1990) apud Melo (2007) que a interligação entre as bacias ocorreu por força de ação antrópica forçando o posicionamento do rio Fragoso como um afluente do rio Paratibe, possivelmente durante a construção da ponte do Janga que liga o município de Olinda ao município de Paulista.

O município de Olinda, insere-se em uma área de clima tropical úmido, classificado como “As” segundo Köppen, caracterizado por temperaturas elevadas ao longo do ano e uma estação seca no verão. A temperatura média anual é de aproximadamente 26°C, com variações modestas devido à influência moderadora do Oceano Atlântico. As máximas mensais geralmente situam-se entre 29°C e 32°C, enquanto as mínimas dificilmente ficam abaixo de 21°C. A precipitação média anual é de cerca de 2.000 mm, distribuída de forma irregular ao longo do ano, com maior concentração entre os meses de abril e julho, período chuvoso, e valores mais baixos entre outubro e janeiro, correspondendo ao período seco. A Figura 2 a seguir apresenta o climograma do município de Olinda-PE.

Figura 2. Climograma do município de Olinda – PE.



Fonte: Autores (2024)

O regime climático de Olinda é influenciado por mecanismos atmosféricos típicos das regiões tropicais, como a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que, em seu deslocamento sazonal em direção ao Hemisfério Sul, intensifica as precipitações durante o período chuvoso. Além disso, os ventos alísios de sudeste trazem umidade do Oceano Atlântico, contribuindo para os elevados índices pluviométricos na região. Outro fator relevante são as ondas de leste, que frequentemente causam chuvas intensas e prolongadas, particularmente nos meses de maior precipitação. A influência da brisa marítima também se destaca, favorecendo a formação de nuvens e chuvas convectivas em áreas costeiras, especialmente no período de maior aquecimento diurno.

Essas características climáticas, aliadas à localização de Olinda em uma planície costeira com cotas baixas, tornam a região altamente vulnerável a inundações. O efeito das marés, associado ao baixo gradiente hidráulico e à alta taxa de impermeabilização do solo, agrava os riscos de alagamentos recorrentes. O conhecimento detalhado do regime climático local e dos mecanismos atmosféricos que o influenciam é essencial para o planejamento urbano, a gestão dos recursos hídricos e a formulação de estratégias de mitigação dos impactos decorrentes de eventos climáticos extremos.

Modelagem hidrológica

Através de modelagem hidrológica, utilizando modelos matemáticos consolidados capazes de reproduzir o ciclo hidrológico e assim espelhar o escoamento superficial como consequência do evento chuvoso, foram realizadas as simulações hidrológicas, por meio do software PCSWMM (James et al., 2013) (extensão do modelo 1D SWMM - Storm Water Management Model, desenvolvido pela “United States Environmental Protection Agency” (U.S EPA)). Este programa demonstrou capacidades de modelagem 1D-2D com várias aplicações, que permite o roteamento de inundações 2D em áreas rurais e urbanas, fornecendo também um excelente plano para a distribuição espacial para aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto (LU et al., 2022).

O modelo PCSWMM da Computation Hydraulics International (CHI) com a referência de hidrologia e hidráulica SWMM5, é baseado nas equações 1-D de Saint-Venant da seguinte forma:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0 \quad (2)$$

Onde Q, H e A denotam a vazão, carga hidráulica e área da seção transversal, respectivamente; g é a aceleração gravitacional; Sf é a inclinação de atrito; e hL é a perda de energia local por unidade de comprimento. As equações de continuidade e quantidade de movimento (conforme mostrado nas Equações (1) e (2), respectivamente) foram resolvidas pelo método de diferenças finitas com aproximações sucessivas (Rossman et al, 2016).

O modelo PCSWMM possui uma interface com o ambiente GIS, facilitando dessa maneira a inserção das sub-bacias e condutos, obtidos anteriormente com a delimitação da bacia. Além disso, o modelo PCSWMM foi aplicado neste estudo com uma limitação pela exclusão da microdrenagem, devido à ausência de informações cadastrais detalhadas sobre o sistema de drenagem urbana.

Os parâmetros de área, largura superficial e declividade foram obtidos por técnicas de geoprocessamento para cada sub-bacia delimitada. Em relação a infiltração, foi utilizado o modelo da Curva Número, apresentados na Tabela 1. Foi considerado o tempo de secagem, que é o número de dias que leva um solo totalmente saturado para secar, de 7 dias, como uma referência média padrão para esse estudo. Os valores típicos podem variar entre 2 e 14 dias.

Tabela 1. Dados de entrada das sub-bacias do modelo PCSWMM

Sub-bacia	Área (ha)	Largura superficial (m)	Declividade (m/m)	Área impermeável	CN
1	326,44	587,92	0,0049	16,24%	51
2	274,68	489,63	0,0058	35,49%	65
3	548,12	619,06	0,0025	42,60%	61
4	231,08	560,86	0,0047	21,70%	61
5	679,4	622,08	0,003	43,00%	70
6	342,64	750,78	0,0004	74,46%	79
7	225,2	353,23	0,0003	84,86%	94
8	230,12	416,56	0,0012	84,56%	94

Fonte: Autores (2024)

Alguns parâmetros como o armazenamento em depressões, que é valor máximo armazenável à superfície por alagamento, encharcamento e interceptação para áreas impermeáveis e permeáveis foram determinadas de acordo com o manual do usuário do programa SWMM. Também foi determinado com auxílio do manual o coeficiente “n” de Manning para o escoamento superficial na parcela da sub-bacia impermeável e permeável e os valores para os condutos (Rossman, 2016). Os valores podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros determinados para dados de entrada no modelo PCSWMM

Armazenamento em depressões (mm)		Coeficiente de rugosidade Manning			
Permeável	Impermeável	Permeável	Impermeável	Canais revestidos	Canais naturais
5,08	2,54	0,15	0,024	0,013	0,040

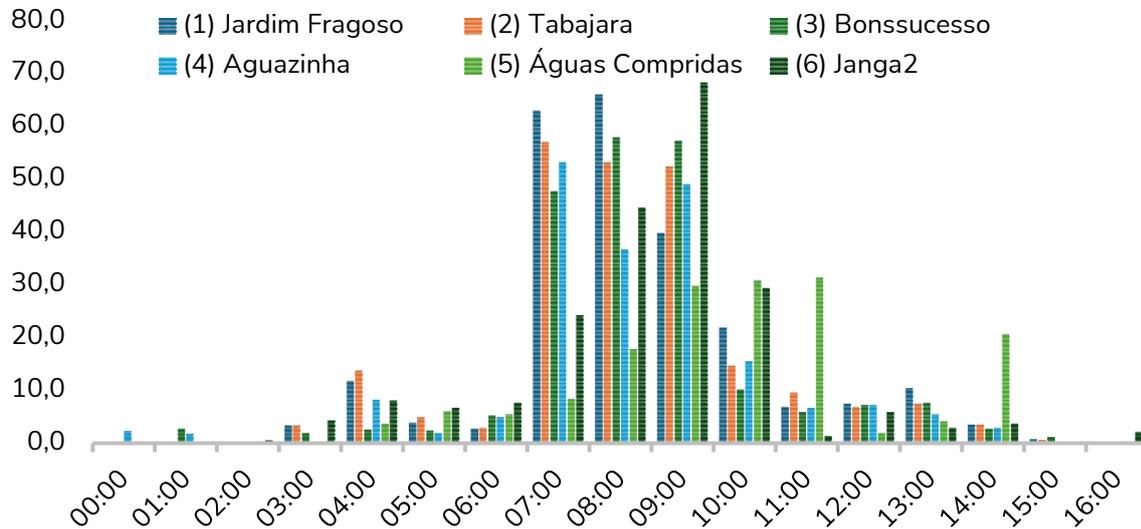
Fonte: Autores (2024)

O evento de precipitação intensa selecionado foi o ocorrido em 30 de maio de 2016, devido à disponibilidade de dados medidos em campo, necessários para a calibração do modelo. A área de estudo não possui monitoramento contínuo de nível d’água ou vazão, e esses dados observados foram medidos por uma equipe técnica de topógrafos, a fim de auxiliar estudos posteriores.

Os dados hidrológicos utilizados foram obtidos a partir das estações pluviométricas de Jardim Fragoso, Tabajara, Bonsucesso, Aguazinha, Águas Compridas no município de Olinda e Janga 2 no município de Paulista, operadas pelo Cemaden. Para simulação inicial, esse evento de precipitação intensa, teve duração de 16 horas, iniciando as 00:00, que provocou uma chuva acumulada de 241 mm. O período mais intenso da precipitação se concentrou num intervalo de 3 horas, iniciando às 07:00 horas, resultando num total precipitado de 168 mm no posto

pluviométrico Jardim Fragoso. A variabilidade pluviométrica é apresentada na Figura 3. Nesse intervalo mais crítico a maré estava relativamente alta, com altura de 1,69 metros.

Figura 3. Variabilidade temporal da chuva de 30 de maio de 2016 nos postos da BHF.



Fonte: Autores (2024)

Para realizar simulações com diversos tempos de retorno, foi utilizado a equação de chuva intensa desenvolvida no Plano Diretor de Drenagem Urbana do Recife, que vem sendo utilizada pelas cidades da Região Metropolitana de Recife (EMLURB, 2016), apresentada na Tabela 3 a seguir.

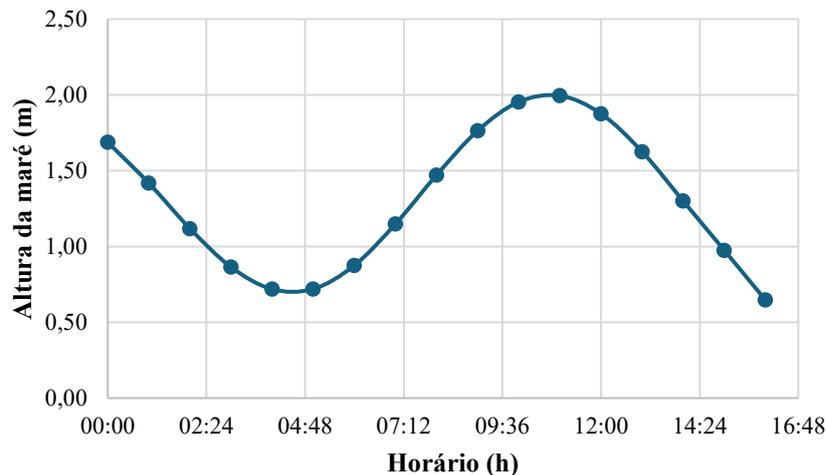
Tabela 3. Resultado do total pluviométrico de chuva de Recife em mm a partir da equação de chuva intensa do Plano Diretor de Drenagem Urbana (2015).

T (min)	t (h)	Resultado do total pluviométrico (mm) de chuva				
		T= 2 anos	T= 10 anos	T= 25 anos	T= 50 anos	T= 100 anos
5	0,08	11,62	15,21	17,73	19,91	22,35
10	0,17	18,72	24,50	28,56	32,06	36,00
15	0,25	23,91	31,28	36,46	40,94	45,97
30	0,50	34,50	45,14	52,61	59,07	66,33
60	1,00	47,44	62,08	72,35	81,23	91,21
120	2,00	63,31	82,84	96,55	108,41	121,72
180	3,00	74,32	97,25	113,34	127,26	142,89
360	6,00	96,93	126,84	147,83	165,98	186,36
720	12,00	125,65	164,42	191,62	215,15	241,57
1440	24,00	162,36	212,46	247,61	278,02	312,16

Fonte: Autores (2024)

Para a curva da maré, os registros foram obtidos da tábua de maré do Porto do Recife, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), para o referido período simulado, ilustrada na Figura 4 a seguir.

Figura 4. Curva de maré para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016.



Fonte: Autores (2024)

Modelagem hidrodinâmica

As modelagens computacionais têm se mostrado uma ferramenta essencial para a compreensão da dinâmica das inundações e para o desenvolvimento de estratégias de mitigação. Isso apoia a tomada de decisão em gestão de riscos de inundação, reduzindo potenciais perdas de vidas e danos materiais. Através da aplicação de modelos hidrodinâmicos, é possível prever a extensão, profundidade e distribuição de velocidade em áreas inundáveis. A integração dessas informações com dados de ativos econômicos, sociais e ambientais permite a quantificação de possíveis danos e a adoção de medidas preventivas e de controle mais eficazes (Gomes et al, 2021).

A modelagem hidrodinâmica foi realizada com auxílio do modelo computacional HEC-RAS 5.0.7, software de domínio público desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos “US Army Corps of Engineers”, que tem como finalidade realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para rede de rios e canais naturais e artificiais (USACE, 2016).

Na modelagem bidimensional em regime não permanente, o modelo utiliza as equações bidimensionais de Águas Rasas (também chamadas de equações bidimensionais de Saint-Venant, referentes à equação da continuidade e à equação da quantidade de movimento) ou as equações da Onda Difusa. A discretização das equações da Onda Difusa é realizada utilizando o método das diferenças finitas para o tempo e um esquema híbrido combinando os métodos das diferenças finitas e dos volumes finitos para a discretização do espaço (USACE, 2016).

As equações de Águas Rasas em duas dimensões são apresentadas a seguir, sendo a Equação 3 a da continuidade e as Equações 4 e 5 as da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v \quad (4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + \nu_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u \quad (5)$$

Onde: H - elevação da superfície da água que é igual à elevação da superfície do terreno mais a altura da lâmina de água (m); t - tempo; h - altura da lâmina de água (m); u e v - são as componentes da velocidade nas direções x e y , respectivamente; x e y - direções cartesianas; q - fluxo de entrada/saída; g - aceleração da gravidade; ν_t - coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal; c_f - coeficiente de atrito; e f - parâmetro de Coriolis.

Ao acoplar as modelagens hidrológica e hidrodinâmica, é possível obter uma representação completa do processo de escoamento das águas superficiais. Essa abordagem pode ser aplicada em diversas simulações, permitindo o mapeamento das áreas inundáveis e a avaliação de índices de risco e perigo. Além disso, é possível avaliar a eficiência de medidas estruturais e técnicas compensatórias, bem como desenvolver sistemas de alerta de inundações para ajudar na preparação para possíveis eventos futuros.

Para a base topográfica, utilizou-se os dados do programa Pernambuco Tridimensional (PE3D), para garantir a qualidade dos resultados. Este programa utilizou varredura a laser e ortoimagens de alta resolução de toda a superfície territorial pernambucana, obtendo um modelo digital do terreno (MDT) com precisão altimétrica superior a 25 cm e escala de 1:1.000. As imagens foram obtidas por meio da tecnologia LiDAR (Light Detection and Ranging) de alta precisão, que utiliza sensores e câmeras instalados em aviões e assim permitem uma compreensão mais realista do comportamento da bacia hidrográfica em eventos extremos (Cirilo *et al*, 2014).

O uso de LiDAR altamente preciso é vantajoso na criação de mapas de inundação mais próximos da realidade. Assim, os dados de alta resolução fornecem estimativas mais precisas da topografia local e são úteis para reduzir a incerteza e assim fornecer dados mais confiáveis para modelagem hidrodinâmica, sendo fundamentais para a gestão de risco de inundação e auxiliam com a identificação de áreas vulneráveis, a fim de implementar medidas de prevenção de desastres (Brussee *et al*, 2021).

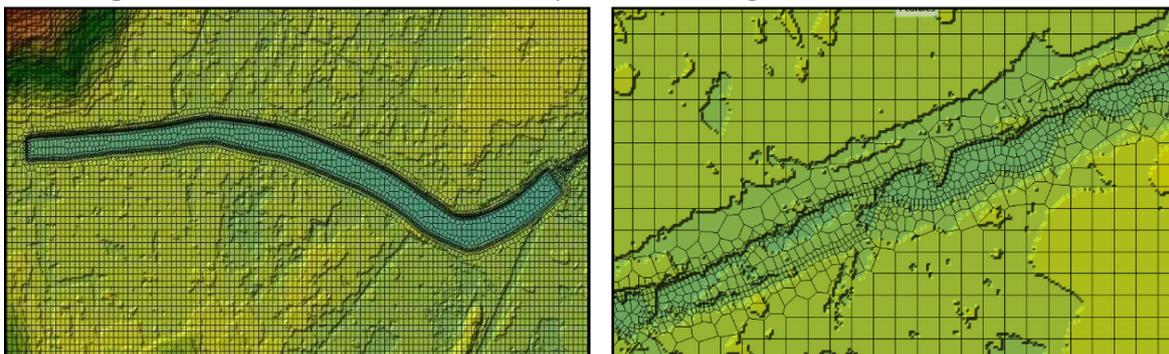
A definição das características geométricas do HEC-RAS 2D para a construção da malha computacional de escoamento foi efetuada considerando, células quadradas com 10 m de lado para a geração dos mapas de extensão da inundação e de profundidades dos picos de cheias.

Foram testadas malhas quadradas com 2 m e 5m, em busca de mais precisão para o modelo, mas não foi obtida estabilidade. O tamanho e a localização das células de Fluxo 2D são definidos pelo usuário e, portanto, o processo requer o conhecimento a priori da morfologia e das vias de escoamento na planície de inundação.

Esse conhecimento da área de estudo é importante porque o HEC-RAS define nos resultados uma única elevação da superfície da água para cada célula e cada face da célula. O gradiente hidráulico da célula é calculado em duas dimensões utilizando as equações completas de Saint Venant ou a equação da onda de difusão, juntamente com a equação da conservação da massa.

Para aumentar a precisão do modelo na região do rio Fragoso canalizada e natural, região de maior interesse, foi realizado um refinamento da malha através do uso de linhas de quebra (BreakLines) e então redução do tamanho das células, com o objetivo de orientar o escoamento. As dimensões das células nas áreas refinadas variaram entre 2m x 2m até atingir as dimensões da malha original de 10m x 10m, exemplificas na Figura 5.

Figura 5. Refinamento da malha para o rio Fragoso canalizado e natural.



Fonte: Autores (2024)

Foi determinado o coeficiente de rugosidade de Manning espacializado para toda a bacia, utilizando como referência o mapa de uso e ocupação do solo para o ano de 2016, obtido a partir do MapBiomias. A espacialização ficou dividida em 6 classes: área urbana, pastagem, agricultura, floresta, rio canalizado e rio natural. Foram determinadas as condições de contorno internas para cada sub-bacia (1 a 8), inserindo os respectivos hidrogramas de entrada para o evento hidrológico simulado, com intervalo de tempo a cada minuto. Como condição de contorno de saída, foi definido a curva de maré no exutório da bacia. O passo de tempo utilizado para as simulações foi de 1 minuto, assim como os intervalos de resultados, atendendo as condições de Courant.

Outro ponto importante na análise das cheias na BHF é a condição de contorno de jusante na foz do rio Fragoso no trecho final do rio Paratibe, próximo da ponte do Janga. Se o nível d'água do rio Paratibe estiver muito elevado, dificulta o escoamento das águas do rio Fragoso na foz, represando as águas e piorando as inundações.

As causas para o nível elevado do Paratibe podem ser: chuvas muito intensas na bacia do Paratibe no município de Paulista, marés altas de sizígia, a elevação do nível do mar devido às mudanças climáticas.

Cenários de simulação

O município de Olinda passa por uma ampliação do seu sistema viário com a melhoria das condições de tráfego em busca de melhor mobilidade na Via Metropolitana Norte, que prevê a integração entre a PE-15 (Olinda) e a PE-01 (Paulista). O projeto, promovido por parceria dos Governos Estadual e Federal e prevê, ainda, a canalização de parte do rio Fragoso.

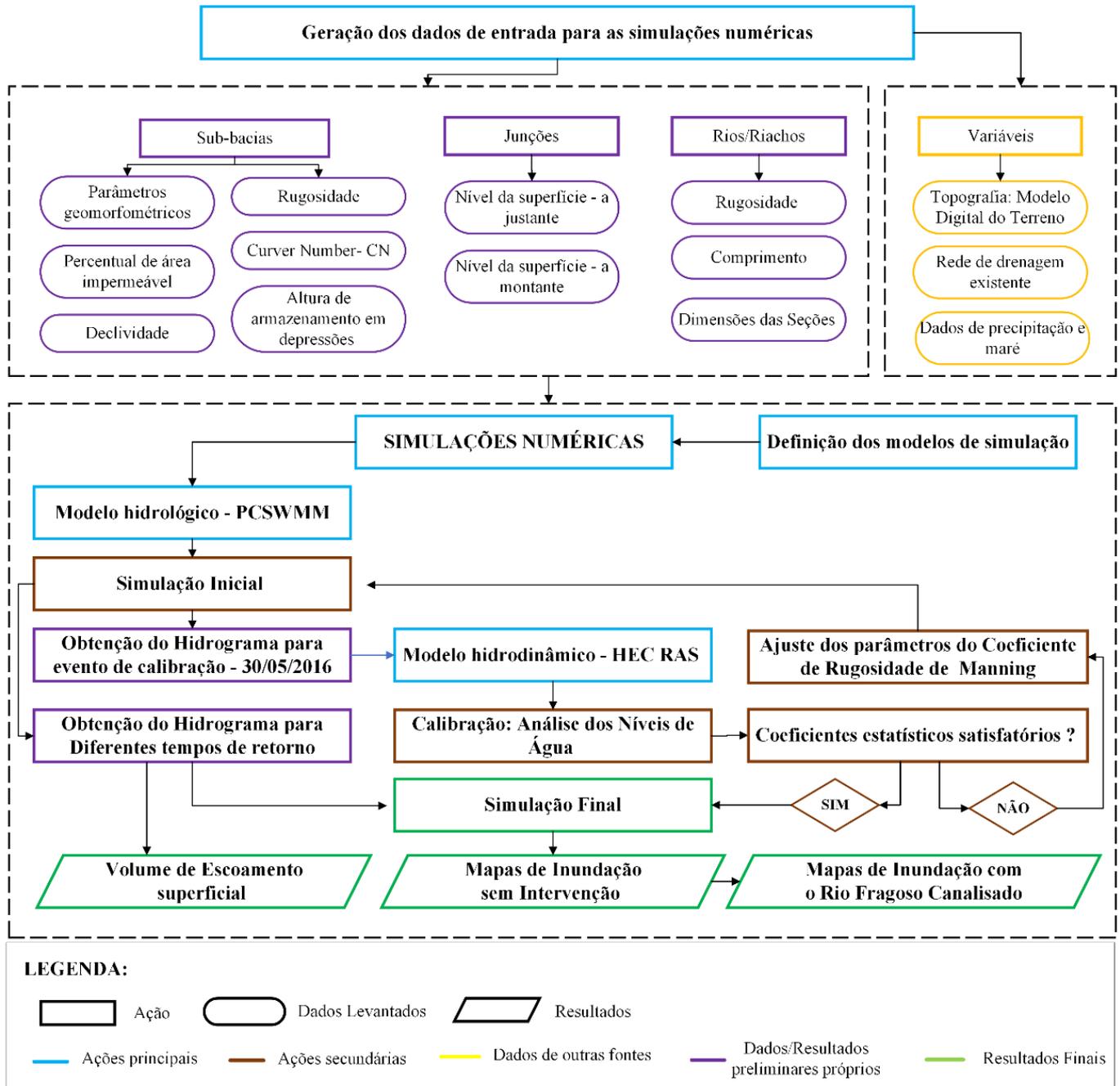
As obras do canal do Fragoso foram licitadas em 2012 e tiveram início em setembro de 2013, sob a responsabilidade da Companhia Pernambucana de Habitação e Obras (CEHAB), Secretaria das Cidades e Prefeitura Municipal de Olinda. Atualmente as obras do canal são administradas pela CEHAB. O Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco (TCE-PE) vem atuando no projeto desde janeiro de 2014 para acompanhar a execução do contrato que prevê o revestimento do Canal do Fragoso – 2ª Etapa e Construção de oito Obras de Arte.

Diante desse contexto, foram considerados dois cenários para realizar as modelagens e ser possível comparar os impactos das diferentes propostas. Inicialmente, foi simulado um cenário estimando as condições atuais da bacia, sem medidas compensatórias. O segundo cenário abordou as condições futuras de finalização da obra de macrodrenagem da bacia, com o rio Fragoso em seção retangular constante de 45 metros de largura. O modelo também foi adaptado em relação ao coeficiente de Manning para modificar a espacialização do rio natural para o rio canalizado.

As intensidades das precipitações foram variadas através da mudança do tempo de retorno dos eventos, para o qual foram considerados os valores de 25, 50 e 100 anos, tendo assim uma maior variabilidade na intensidade da precipitação.

A Figura 6 ilustra de maneira esquemática os parâmetros e variáveis necessários para as etapas de modelagens realizadas.

Figura 6. Fluxograma de etapas metodológicas.



Fonte: Autores (2024)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características físicas da bacia do Rio Fragoso

A análise das características físicas da BHF revela importantes fatores influentes no comportamento hidrológico da área, ressaltando a relação entre o regime hidrológico e os elementos físicos da bacia. Estes aspectos físicos desempenham papel relevante na dinâmica do escoamento superficial.

A bacia possui uma área de 28,57 km² e perímetro de 46,28 km. O fator de forma da bacia foi calculado como 0,132, indicando uma rede de drenagem alongada. Valores próximos a 1,0 seriam típicos de bacias circulares, enquanto valores baixos, como o obtido, confirmam o formato alongado. Complementarmente, o coeficiente de compactidade (2,424) e o índice de circularidade (0,168) reforçam essa característica geomorfológica.

O canal principal da bacia possui um comprimento de 14,72 km, enquanto a rede de drenagem totaliza 26,253 km, com uma densidade de drenagem de 0,919 km/km². Segundo os parâmetros estabelecidos por Sthraler (1957), esse valor representa uma baixa densidade de drenagem (classificada como baixa abaixo de 5,0 km/km², média entre 5,0 e 13,5 km/km², alta entre 13,5 e 155,5 km/km² e muito alta acima de 155,5 km/km²). Esse fator é condicionado tanto pelo clima, que influencia diretamente o regime e a vazão dos cursos d'água, quanto pelas características físicas da bacia.

O coeficiente de manutenção da bacia foi calculado em 1.088,49 m² de área de contribuição para cada metro de canal de escoamento, indicando a área necessária para a manutenção do fluxo hídrico. O índice de sinuosidade da bacia foi de 1,727, denotando um curso fluvial não totalmente retilíneo, mas também não sinuoso. Valores superiores a 2,0 sugeririam canais mais tortuosos, enquanto valores próximos a 1 indicam canais retilíneos.

Quanto à elevação, os dados do Modelo Digital de Terreno (MDT) indicam uma variação altitudinal entre 2 e 70 metros, com altitude média de 30,75 metros e declividade média de 9,55 graus. A declividade média exerce influência significativa no planejamento de intervenções na bacia, com implicações para a legislação ambiental e a eficiência das práticas de manejo. Declividades elevadas, associadas a uma cobertura vegetal insuficiente, tipo de solo e alta intensidade de precipitação, podem resultar em maior velocidade de escoamento e menor retenção de água no solo, levando a enchentes mais frequentes e maior degradação ambiental (Tonello, 2006). Assim, a susceptibilidade à erosão do solo e a intensidade dos picos de enchentes estão diretamente relacionadas com a rapidez do escoamento superficial, característica fortemente influenciada pelo relevo da bacia.

Avanço da urbanização com uso do MapBiomas

A urbanização contribui para as inundações ao aumentar as mudanças no uso e cobertura do solo, o que afeta amplamente a extensão da inundação em escala regional e local (Huang et al, 2017). Zhou et al (2019) analisou os impactos da urbanização e das mudanças climáticas no

norte da China e verificou que a urbanização aumenta o escoamento superficial anual em 208 a 413%, aumentando os volumes anuais esperados de inundação de 194 a 942%. A BHF é destaque na região em virtude do grande avanço da urbanização, que aumenta as taxas de escoamento superficial e descarga dos rios, resultando em maior risco de inundação.

O banco de dados MapBiomas Brasil (<https://brasil.mapbiomas.org/>) foi usado para avaliar mudanças no uso e ocupação do solo. O MapBiomas fornece dados anuais com uma resolução espacial de 30 m de imagens recuperadas da constelação Landsat (Souza et al., 2020). A classificação é atualizada periodicamente à medida que cada conjunto de dados é revisado. Na última atualização, que inclui dados de 2023, mais de 85.150 pontos de amostragem foram usados em todo o Brasil.

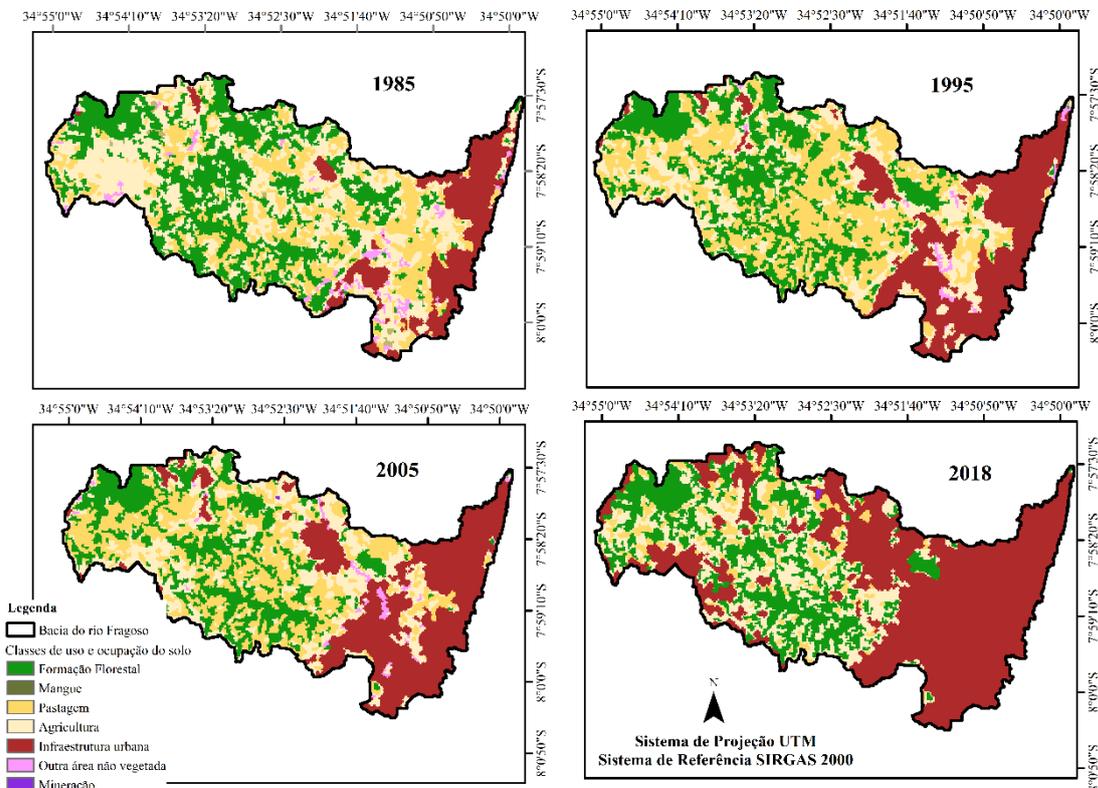
Assim, com base nas informações da plataforma MapBiomas, foram realizadas análises as classes do uso da terra para os anos de 1985 a 2018. Nesse estudo, foram identificadas duas classes de cobertura natural (Formação Florestal e Mangue) e cinco classes de uso da terra influenciados pelo homem (Pastagem, Agricultura, Infraestrutura Urbana, Mineração e Outra área não vegetada).

Ao analisar BHF ao longo dos anos, observou-se que a Formação Florestal ocupava inicialmente cerca de 29% da área total. Essa cobertura apresentou uma redução gradual, atingindo aproximadamente 22% em 2018. A área destinada a Pastagem, que ocupava cerca de 22% no início do período analisado, aumentou significativamente até alcançar 34,8% em 1997. Posteriormente, sofreu uma redução acentuada, representando apenas 7% da área total em 2018.

A Agricultura, que no início ocupava cerca de 33% da área, apresentou uma redução contínua ao longo do tempo, chegando a aproximadamente 20% em 2018. Por outro lado, a Infraestrutura Urbana mostrou um crescimento expressivo: de 13,7% no início da análise, alcançou 51% da área total em 2018. Este crescimento é ainda mais acentuado nas sub-bacias 6, 7 e 8, onde os índices de urbanização ultrapassaram 70% e 80%, respectivamente.

A Mineração foi identificada em pequenas áreas ao longo dos anos analisados, enquanto outras áreas não vegetadas corresponderam a aproximadamente 2,3% da área total. Além disso, houve presença de corpos hídricos, como rios e lagos. Entre 1985 e 2007, ainda foi possível identificar pequenas áreas de Mangue, embora em proporções reduzidas. As mudanças na cobertura e no uso do solo nos anos de 1985, 1995, 2005 e 2018 estão representadas na Figura 7.

Figura 7. Variação do uso e ocupação do solo na bacia do Rio Fragoso.



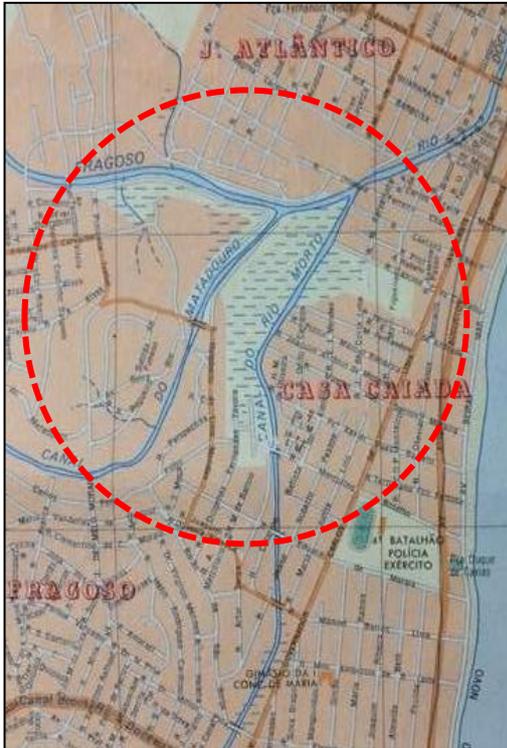
Fonte: Autores (2024)

Apesar de contar com 488 anos de história, Olinda é uma cidade que enfrenta desafios urbanos complexos. No início da sua urbanização, a população ocupou as áreas mais valorizadas, mas a partir da segunda metade do século XX, as ocupações se intensificaram nas proximidades do rio Fragoso, região que apresenta maior vulnerabilidade. Isso evidencia a necessidade de políticas públicas que contemplem o planejamento urbano e o ordenamento territorial, visando garantir a qualidade de vida e a segurança das populações mais vulneráveis.

Na classificação do MapBiomas para os primeiros anos analisados ainda foram observados ecossistemas associados aos manguezais e restingas, não mais identificados atualmente, devido ao processo de urbanização da bacia. Os manguezais são um dos ecossistemas mais produtivos do planeta, além de contribuir com a redução da vulnerabilidade da zona costeira às mudanças climáticas (ICMBIO,2018).

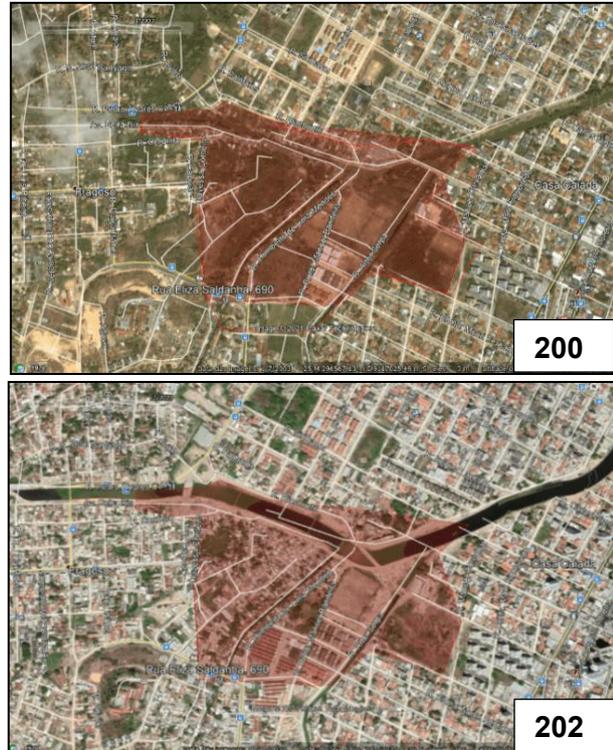
Outro aspecto geográfico pode ser observado com base na Carta da Nucleação Centro (1987) – Projeto Grande Recife, desenvolvido pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife (FIDEM), do Governo do Estado de Pernambuco, onde é possível identificar a presença de áreas de manguezais na BHF (Figura 8). Através de imagens de satélite em 2003 ainda eram identificadas áreas de mangue, mas em 2020 a área é totalmente ocupada por infraestrutura urbana, com presença do canal do Fragoso em desenvolvimento (Figura 9).

Figura 8. Presença de manguezais na bacia do rio Frágoso em 1987.



Fonte: FIDEM (1987).

Figura 9. Identificação de áreas de manguezais em 2003 e avanço da urbanização em 2020.



Fonte: Google Satélite.

Fonte: Autores (2024)

O desaparecimento dos manguezais na BHF ao longo das últimas décadas tem relação direta com o aumento das inundações. Como indicado por ICMBio (2018), os manguezais desempenham um papel essencial na absorção de águas pluviais e na contenção de inundações em zonas costeiras. A substituição desses ecossistemas por áreas impermeáveis intensifica o escoamento superficial, reduzindo a capacidade de infiltração da água no solo.

A análises de imagens históricas apresentadas revelam que, entre 1985 e 2020, a área de manguezais na bacia foi drasticamente reduzida, sendo substituída por infraestrutura urbana e áreas de ocupação irregular. Esse processo está diretamente ligado ao aumento da severidade das inundações, conforme demonstrado por estudos como os de Zhou et al. (2019), que identificaram um crescimento de até 400% no volume de escoamento superficial devido à urbanização descontrolada em áreas vulneráveis.

Diante desse cenário, recomenda-se a implementação de medidas compensatórias, como a recuperação de áreas verdes e a criação de infraestruturas baseadas na natureza, que possam mitigar os impactos negativos da urbanização sobre os padrões de drenagem da bacia.

Calibração do modelo

A calibração do modelo hidrológico e hidrodinâmico é de grande importância para que o modelo produza resultados precisos e confiáveis, o que é fundamental para a tomada de decisões informadas sobre a gestão de recursos hídricos. Assim, para tornar o modelo o mais próximo da realidade, a calibração se deu pela determinação do valor de Manning mais adequado e estável, conforme evidenciado em diversos estudos (Abouelsaad et al, 2024; Soomro et al, 2021; Hameed et al, 2013) utilizando perfis de marca do nível de água do evento extremo de precipitação ocorrido no dia 30 de maio de 2016.

Com a ausência de estações fluviométricas, foram analisadas de forma manual as alturas das manchas de inundação e confrontadas com os dados medidos por uma equipe de topógrafos após o evento mencionado, que realizaram o mapeamento e levantamento das coordenadas geográficas de 20 pontos limitantes da água em região crítica da área de estudo, podendo ser observado na Figura 10, por iniciativa da equipe gestora da obra do Canal do Fragoso em parceria com a Universidade Federal de Pernambuco. Tal levantamento serviu de referência para a obtenção das cotas máximas alcançadas pela inundação.

Figura 10. Distribuição dos pontos de máxima cheia utilizados para calibração com o evento de precipitação intensa em 30/05/2016.

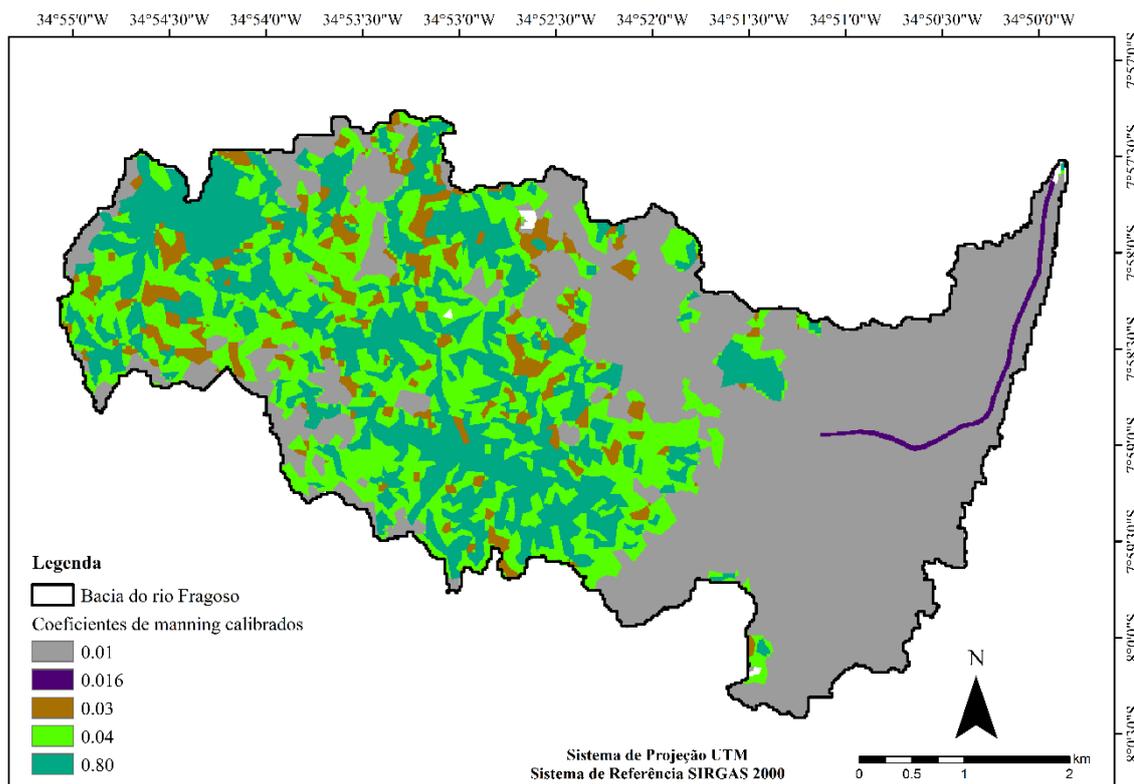


Fonte: Autores (2024)

Neste estudo, o processo de calibração envolveu o ajuste do coeficiente de Manning até que os resultados simulados pelo modelo hidráulico correspondam, o mais próximo possível, aos pontos de elevação da marca d'água observados em campo.

Em busca da consideração do cenário mais próximo da realidade, foi realizada a espacialização dos coeficientes de rugosidade de Manning calibrados, com resultados obtidos após a calibração apresentados na Figura 11.

Figura 11. Espacialização dos coeficientes de Manning calibrados na bacia do rio Fragoso.



Fonte: Autores (2024)

Para avaliação estatística do desempenho do modelo, foram comparados os dados observados e simulados com base em diversos parâmetros estatísticos como o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE), Coeficiente de determinação (R^2), Percent Bias (PBias) e RSR. Zappa (2002) propõe valores acima de 0,5 para NSE. Gotschalk e Motovilov (2000), apud Van Liew et al. (2007), classificam como muito bons os valores de NSE acima de 0,75 e aceitáveis entre 0,75 e 0,36, seja para passo de tempo diário ou mensal. Moriasi et al. (2007) classificam os indicadores de desempenho R^2 com valores acima de 0,5 como satisfatórios.

Os valores dos coeficientes estatísticos obtidos para a calibração da BHF estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Coeficientes de calibração estatística para a bacia do Rio Fragoso.

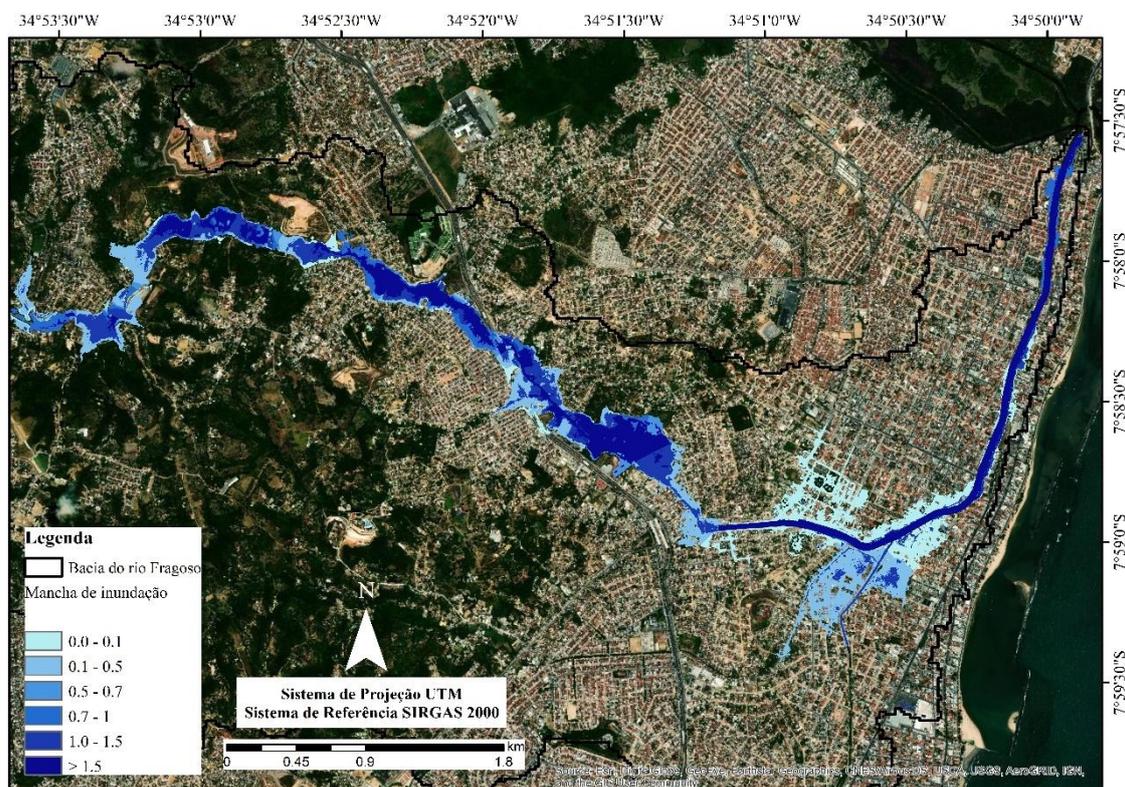
Coeficientes Estatísticos	NSE	R^2	PBIAS	RSR
Valores obtidos com a calibração para 30/05/2016	0,685	0,777	6,110	0,562

Fonte: Autores (2024)

De forma geral, os resultados estatísticos indicaram um desempenho satisfatório do modelo hidrológico utilizado para as simulações, de acordo com os valores recomendados pela literatura. Isso sugere que o modelo foi capaz de prever com precisão as inundações e que os resultados obtidos podem ser utilizados com segurança para aprimorar os sistemas de alerta de enchentes e outras medidas de prevenção de desastres naturais.

A Figura 12 apresenta a mancha de inundação estimada pela simulação hidrodinâmica bidimensional para o evento de precipitação intensa ocorrido no dia 30 de maio de 2016, com as características físicas no modelo digital do terreno para o ano de 2016, que serviu de referência para calibração do modelo hidrodinâmico. A análise apresentou uma área alagada de 2,86 km². Os bairros Jardim Atlântico, Fragoso, Jardim Fragoso e faixa oeste de Casa Caiada, foram os mais afetados de acordo com essa simulação.

Figura 12. Mapa da mancha de inundação na BHF para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016.

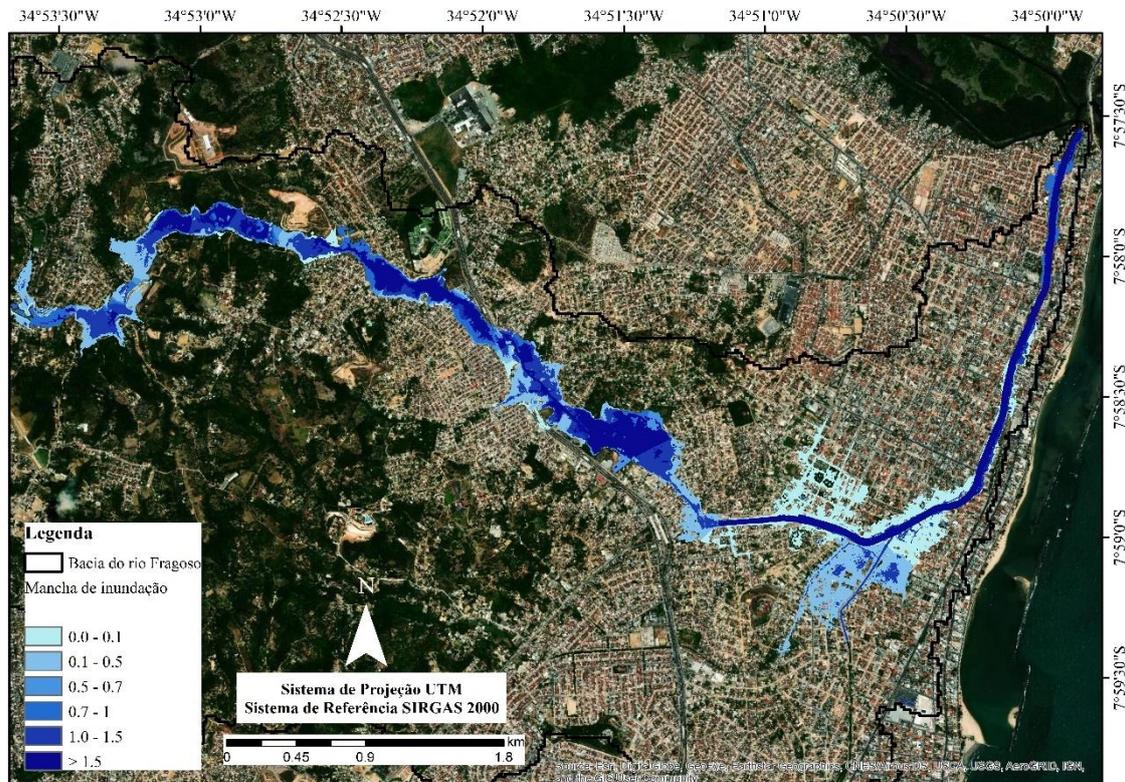


Para a simulação de calibração e para os diferentes tempos de retorno simulados com duração de 180 minutos (tempo de concentração estimado para a BHF pelo método de Kirpich), o software PCSWMM apresentou erros de continuidade menores que 10%, abaixo do máximo tolerável, indicando resultados satisfatórios e simulações de boa qualidade.

Dessa forma, o modelo apresentou-se de forma satisfatória e coerente com a realidade, sendo então utilizado para as simulações de cenários posteriores.

A Figura 13 apresenta a mancha de inundação com simulação do evento de precipitação ocorrido em 30 de maio, caso a obra do canal do Fragoso já estivesse finalizada.

Figura 13. Mapa da mancha de inundação na BHF para o evento de precipitação intensa em 30 de maio de 2016 considerando a obra do canal finalizada.



Fonte: Autores (2024)

Modelagens hidrodinâmicas em diferentes cenários de simulações

Após a etapa de calibração do modelo, foram realizadas as análises das simulações correspondentes aos diferentes cenários estudados. A Tabela 5 apresenta os resultados de vazões e volumes gerados para cada sub-bacia, permitindo uma avaliação detalhada do comportamento hidrológico e das variações entre os cenários simulados baseados em diferentes tempos de retorno. Esses dados são essenciais para subsidiar estratégias de gestão hídrica e mitigação de impactos.

Tabela 5. Dados de vazão e volume de escoamento por sub-bacias em diferentes cenários.

Sub-bacia	Calibração		TR = 25 ANOS		TR = 50 ANOS		TR = 100 ANOS	
	Q máx (m ³ /s)	Q máx (m ³ /s)	Volume máx (mm)	Q máx (m ³ /s)	Volume máx (mm)	Q máx (m ³ /s)	Volume máx (mm)	
01	12,59	21,85	95580	25,32	118500	29,21	145200	
02	17,41	37,71	162300	43,99	192700	50,93	226200	
03	56,31	63,51	319400	74,73	375800	87,02	438500	
04	24,30	21,66	102100	25,36	124400	29,55	149400	
05	62,77	76,24	437800	90,2	516500	105,6	603200	
06	54,78	44,01	326400	52,86	373500	62,7	424100	
07	35,41	24,98	239300	29,76	271400	34,94	305700	
08	33,19	42,6	248000	50,71	280900	59,59	315900	

Fonte: Autores (2024)

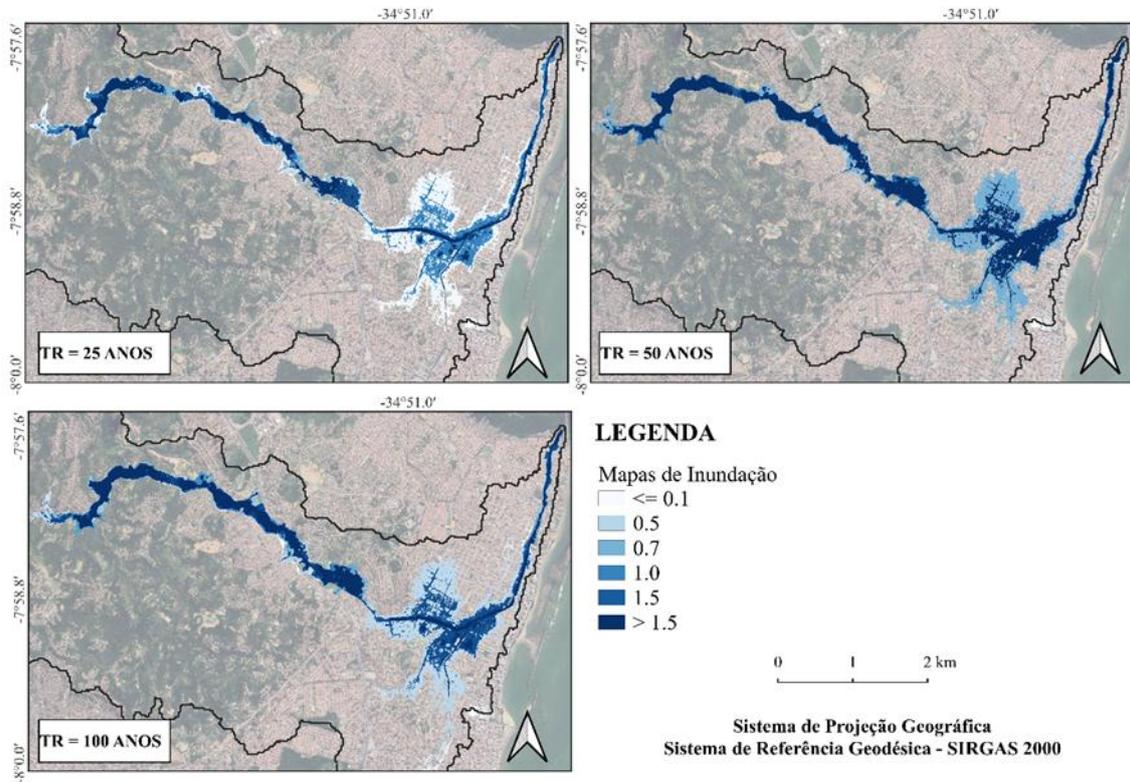
Os resultados do mapeamento de inundações foram normalizados a fim de auxiliar na identificação da planície de inundação do rio Frágoso as áreas com maior dano potencial à população, servindo como referência para gestão de risco de inundação, incluindo planejamento espacial e priorização de medidas necessárias. O mapeamento das áreas na região analisada, mostra o potencial positivo do método para identificar lugares que possam sofrer danos causados pelas inundações.

Os valores considerados para a faixa de normalização da cota de inundação consideram que cotas menores que 10 cm limitam a água às ruas, devido à altura média do meio-fio, que é de aproximadamente 15 cm. Quando uma cota atinge 50 cm, a inundação começa a alcançar ruas, calçadas, parques, canteiros e quintais, podendo interromper o tráfego de veículos e pedestres e afetar residências com soleiras próximas ao nível da calçada.

A partir de 70 cm, a água provavelmente invade o interior das casas, causando danos à estrutura e aos bens. Com 100 cm, quase todos os bens no interior das residências são atingidos. Por fim, cotas superiores a 150 cm representam um risco ainda maior, pois além de bens e estruturas danificados, podem resultar em afogamento.

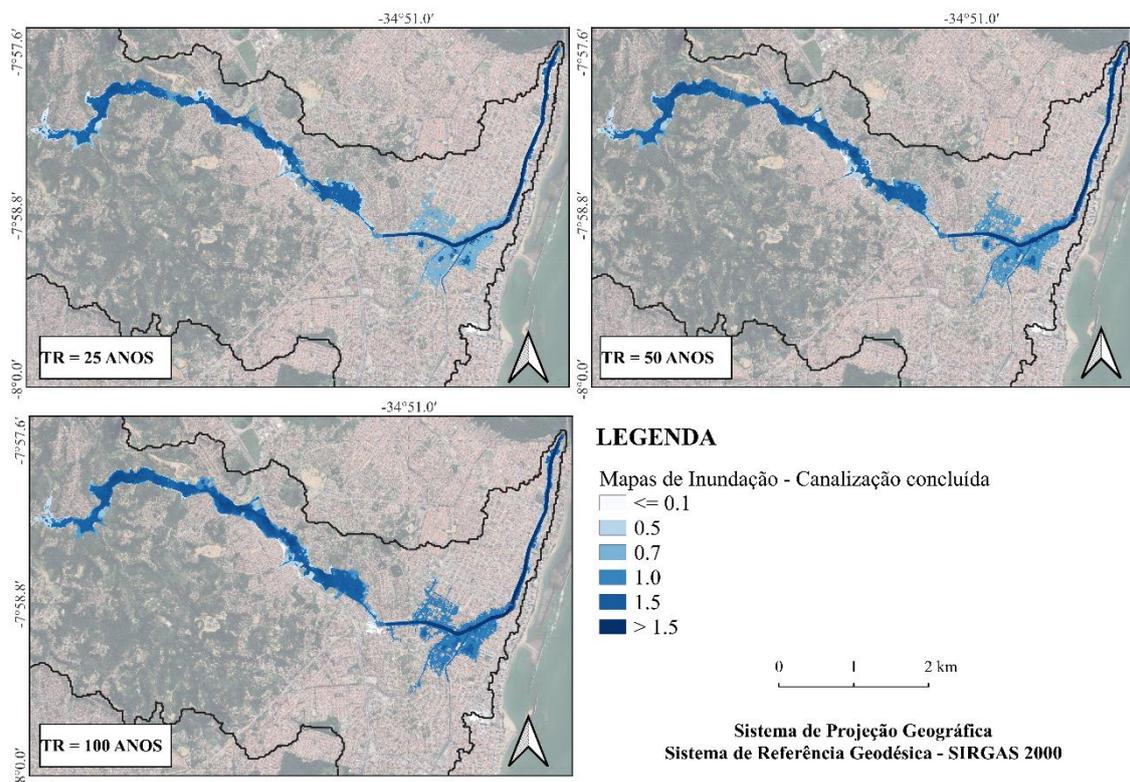
Pode se observar na os mapas de inundação referentes as simulações realizadas com os coeficientes de rugosidade calibrados para o tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos, antes (Figura 14) e depois (Figura 15) das obras do Canal do Frágoso.

Figura 14. Mapa da área alagada na BHF para o tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos antes da obra do canal concluída (ou seja situação até o ano de 2024).



Fonte: Autores (2024)

Figura 15. Mapa da área alagada na BHF para o tempo de retorno de 25, 50 e 100 anos depois da obra do canal concluída (a previsão da conclusão é para dezembro de 2025).



Fonte: Autores (2024)

Tabela 6. Comparação entre as áreas alagadas e as cotas máximas atingidas, considerando a obra do canal Frágoso concluída.

	Tempo de retorno (Tr)		
	25 anos	50 anos	100 anos
Área inundada máxima (Condição sem intervenção)	2,83 km ²	2,90km ²	3,00km ²
Área inundada máxima (Obras finalizadas)	1,87km ²	1,93km ²	2,00km ²
Altura máxima atingida no canal principal (dentro do rio Frágoso)	4,76m	4,90m	5,05m

Fonte: Autores (2024)

O problema é causado, principalmente, pela ocupação urbana desordenada, que gerou diversas situações de vulnerabilidade. Muitas residências foram construídas em áreas de cota muito baixa, que frequentemente sofrem alagamentos. Além disso, a urbanização avançou sobre o leito maior do rio Frágoso, que corresponde à sua planície de inundação, resultando no estreitamento da calha expandida do rio e na conseqüente redução de sua capacidade de escoamento durante os períodos de chuvas mais intensas. No trecho do Alto Frágoso, localizado a oeste da rodovia PE-15, a urbanização também está em curso. Embora o avanço seja mais lento nessa área, as vazões geradas por chuvas intensas nessa parte da bacia já apresentam aumento significativo.

Os resultados das simulações indicam que, mesmo após a canalização do rio Frágoso, persistem áreas vulneráveis à inundação, sobretudo em regiões de baixa altitude e alta densidade populacional. Essa constatação está alinhada com os achados de Shen et al. (2019), que destacam o efeito combinado da impermeabilização do solo e do aumento da frequência de eventos extremos na intensificação das inundações em áreas urbanas costeiras.

Além disso, os impactos das marés nas inundações da BHF reforçam as observações de Takagi et al. (2015) sobre o papel das marés oceânicas no agravamento das enchentes em regiões de baixa declividade. A interação entre as marés e os volumes gerados por chuvas intensas foi identificada como um fator crítico que deve ser incorporado em futuras estratégias de mitigação.

Outro aspecto relevante é a necessidade de políticas públicas mais integradas, como apontado por Sadler et al. (2020), que ressaltam a importância de utilizar modelos hidrodinâmicos acoplados para prever impactos em áreas vulneráveis. Neste contexto, a integração entre PCSWMM e HEC-RAS neste estudo se mostra uma contribuição relevante, pois permite uma análise mais precisa da interação entre precipitação, escoamento e marés.

As áreas de inundação estão associadas a riscos significativos para pessoas e propriedades, exigindo uma abordagem integrada para sua gestão. Recomenda-se que os eventos de inundação sejam analisados de forma conjunta e não apenas como eventos pontuais, permitindo uma melhor compreensão do risco socialmente construído e de como as decisões sobre gestão de riscos são tomadas. Além disso, a percepção pública desempenha um papel fundamental na formulação de políticas públicas e na regulamentação de estratégias de mitigação.

O mapeamento das áreas de inundações por meio de modelagens avançadas é essencial para que as agências responsáveis pela gestão de recursos hídricos e o poder público obtenham uma visão mais precisa da vulnerabilidade local. Ao identificar as regiões mais suscetíveis, autoridades podem implementar medidas preventivas eficazes para proteger a população e a infraestrutura.

Nesse sentido, a identificação das áreas propensas a inundações e a caracterização da distribuição espacial das áreas alagáveis, incluindo a profundidade da lâmina d'água, são fundamentais para reduzir riscos e prejuízos nas cidades. O uso de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos acoplados permite simular cenários distintos, facilitando a previsão dos impactos das enchentes e contribuindo para a formulação de estratégias de mitigação.

Além disso, o desenvolvimento de planos de gestão de desastres de cheias e a elaboração de mapas de risco hidrológico são imprescindíveis para aumentar a resiliência urbana. A construção de diferentes cenários por meio da modelagem hidrológica e hidrodinâmica possibilita a comparação entre estratégias de manejo das águas pluviais, auxiliando no monitoramento da evolução das inundações ao longo do tempo e na tomada de decisões emergenciais.

Como recomendação para estudos futuros, sugere-se a inserção de análises que considerem o impacto potencial de eventos climáticos extremos fora da série histórica. Projeções baseadas em mudanças climáticas indicam que eventos de precipitação podem se tornar mais intensos e frequentes, o que poderia amplificar os desafios enfrentados na gestão das inundações. Farias et al. (2024) avaliaram projeções climáticas de precipitação e temperatura com base nos Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6) para municípios da Região Metropolitana do Recife, que inclui Olinda, revelando impactos significativos. As projeções indicam uma tendência de aumento nas temperaturas máximas e mínimas, enquanto para precipitação destacam-se incertezas quanto aos volumes de chuva, com tendência de redução da precipitação total, mas aumento na intensidade pluviométrica. Araújo et al. (2024) reforça a necessidade de monitorar os efeitos das mudanças climáticas, realizando análises em todo o estado de Pernambuco e corroborando os resultados de Farias et al. (2024) e Marengo (2017), que também indicam elevação das temperaturas e redução da precipitação total anual. A inclusão desses cenários em modelagens futuras permitirá uma avaliação complementar da vulnerabilidade da região e contribuirá para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de adaptação e mitigação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Frágoso (BHF) evidencia os desafios enfrentados em uma região costeira densamente urbanizada, de baixa altitude, elevada pluviosidade, baixo gradiente hidráulico, lençol freático elevado e sujeita à influência de marés. A aplicação de modelagem hidrológica e hidrodinâmica por meio dos softwares PCSWMM e HEC-RAS permitiu compreender as dinâmicas de alagamento em diferentes cenários, fornecendo subsídios técnicos para a gestão de recursos hídricos e planejamento urbano.

Os resultados mostram que, as áreas máximas alagadas variam de 1,87 km² a 2,00 km², para os tempos de retorno analisados de 25, 50 e 100 anos e embora as obras de canalização do rio Frágoso reduzam parcialmente as áreas de alagamento em aproximadamente 30%, elas não eliminam completamente os problemas de inundação. Fatores como a ocupação desordenada, o estreitamento da calha do rio, o assoreamento e o acúmulo de resíduos continuam comprometendo a capacidade de escoamento, especialmente em eventos de precipitação intensa. Além disso, a análise aponta que a vulnerabilidade da BHF é agravada pela interação entre mudanças climáticas e cenários futuros de elevação do nível do mar, aspectos que devem ser incorporados em estudos futuros para ampliar a eficácia das intervenções.

A BHF possui os problemas de alagamentos acentuados principalmente pela ocupação desordenada, em que muitas residências foram construídas em locais de cota muito baixa, que frequentemente são alagadas e outras moradias ocuparam de forma irregular o leito maior do rio Frágoso, com o estrangulamento da calha do rio e conseqüentemente a diminuição da capacidade de escoamento.

Os resultados deste estudo reforçam a necessidade de uma abordagem integrada na gestão das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Frágoso. Para minimizar os impactos das enchentes e aumentar a resiliência da região, é fundamental a implementação de medidas estratégicas por parte dos gestores públicos. Entre essas medidas, destaca-se a importância do monitoramento contínuo das condições hidrometeorológicas, com a implantação de sistemas de alerta precoce que permitam uma resposta mais eficiente a eventos extremos. Além disso, é essencial um planejamento urbano sustentável, com restrições à ocupação em áreas de alta vulnerabilidade e incentivo a práticas de urbanização resiliente.

A adoção de infraestrutura verde também se mostra necessária, incluindo a recuperação de áreas de manguezais e a criação de sistemas de drenagem natural para mitigar o escoamento superficial. Paralelamente, a gestão integrada de riscos deve ser fortalecida, incorporando planos de adaptação climática que considerem projeções futuras de precipitação e elevação do nível do mar. A conscientização da população também desempenha um papel crucial, sendo indispensáveis campanhas educativas que informem sobre os riscos das inundações e incentivem medidas preventivas.

Este estudo reforça a relevância de integrar avanços tecnológicos, como a modelagem bidimensional e o uso de dados de alta resolução, ao planejamento urbano e à gestão de desastres. Além disso, destaca a importância de considerar o contexto das mudanças climáticas e suas implicações para comunidades costeiras, buscando estratégias mais robustas e sustentáveis para a mitigação de riscos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo incentivo à pesquisa e pela concessão de bolsa de Pós-Graduação; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa; ao Governo do Estado de Pernambuco pela disponibilidade dos dados topográficos do programa Pernambuco Tridimensional (PE-3D), ao Centro de Monitoramento e Prevenção à Desastres (CEMADEN) pelo banco de dados hidrológicos e à CHI Water pela concessão da licença do software PCSWMM, que foi essencial para a execução das análises realizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABOUELSAAD, O., HASSAN, A., OMAR, M., HINKELMANN, R. (2024). Identifying manning roughness coefficient using automatic calibration method and simulation of pollution incidents in the Nile River, Egypt. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 55, 101908. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101908>.
- ADAMS, S.; AICH, V.; ALBRECHT, T.; BAARSCH, F.; BOIT, A.; CANALES TRUJILLO, N.; CARTSBURG, M.; COUMOU, D.; EDEN, A.; FADER, M.; HARE, B.; HOFF, H.; JOBBINS, G.; JONES, L.; KIT, O.; KRUMMENAUER, L.; LANGERWISCH, F.; LE MASSON, V.; LUDI, E.; MARCUS, R.; MENGEL, M.; MOSELLO, B.; MÖHRING, J.; NORTON, A.; OTTO, I. M.; PERETTE, M.; PEREZNIETO, P.; RAMMIG, A.; RECKIEN, D.; REINHARDT, J.; REYER, C.; ROBINSON, A.; ROCHA, M.; SAKSCHEWSKI, B.; SCHAEFFER, M.; SCHAPHOFF, S.; SCHEWE, J.; SCHLEUSSNER, C.; SERDECZNY, O.; STAGL, J.; THONICKE, K.; WAHA, K. & WORLD, B. (2014). *Latin America and the Caribbean: 4o Turn down the heat - confronting the new climate normal*. World Bank Group, v.2, 275p.
- ARAÚJO, D.C.S., MONTENEGRO, S.M.G.L., SILVA, S.F., FARIAS, V.E.M., RODRIGUES, A.B. (2024). Analysis of climate change scenarios using CMIP6 models in Pernambuco, Brazil. *Brazilian Journal of Environmental Sciences*, 59, e1868.
- BRUSSEE, A.R.; BRICKER, J.D.; BRUIJN, K.M., VERHOEVEN, G.F.; WINSEMIUS, H.C.; JONKMAN, S.N. (2021). Impact of hydraulic model resolution and loss of life model modification on flood fatality risk estimation: Case study of the Bommelerwaard, The Netherlands. *Journal of Flood Risk Management*, v.14, n. 3, p. 1-15.
- CEMADEN - CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS. (2016-2026). Mapa Interativo.
- CIRILO, J. A.; ALVES, F. H. B.; SILVA, L. A. C.; CAMPOS, J. H. de A. L. (2014). Suporte de Informações Georreferenciadas de Alta Resolução para Implantação de Infraestrutura e Planejamento Territorial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.7, n.4, p. 755-763.
- DOUNTICHEVA, I., SANZ, D., PENCHEV, P., CASSIRAGA, E., GALABOV, V., & GÓMEZ-ALDAY, J. (2023). Assessing 1D Hydrodynamic Modeling of Júcar River Behavior in Mancha Oriental Aquifer Domain (SE Spain). *Water*. <https://doi.org/10.3390/w15030485>.
- ELDHO, T., ZOPE, P., & KULKARNI, A. (2018). Urban Flood Management in Coastal Regions Using Numerical Simulation and Geographic Information System, 205-219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812056-9.00012-9>.
- ELKHRACHY, I.; PHAM, Q.B.; COSTACHE, R.; MOHAJANE, M.; RAHMAN, K.U.; SHAHABI, H.; LINH, N.T.T.; ANH, D.T. (2021). Sentinel-1 remote sensing data and Hydrologic Engineering Centres River Analysis System two-dimensional integration for flash flood detection and modelling in New Cairo City, Egypt. *Journal of Flood Risk Management*, v. 14, n. 2, p. 1-17.

- EMLURB - EMPRESA DE MANUTENÇÃO E LIMPEZA URBANA. (2016). Plano Diretor de Drenagem e Manejo das Águas Urbanas do Recife: Relatório do diagnóstico do sistema de drenagem existente. ABF Engenharia LTDA, Recife, 333p.
- FARIAS, V.E.M., RODRIGUES, A.B., MONTEIRO, P.B.C., ARAÚJO, D.C.S., MONTENEGRO, S.M.G.L., CABRAL, J.J.S.P. (2024). Perspectivas climáticas futuras com base nos modelos do CMIP6 para municípios da Região Metropolitana do Recife (PE), Brasil. *Revista Caminhos de Geografia*, 25(101), 58-79. <https://doi.org/10.14393/RCG2510171642>
- FAVA, M.; MAZZOLENI, M.; ABE, N.; MENDIONDO, E.; SOLOMATINE, D. (2020). Improving flood forecasting using an input correction method in urban models in poorly gauged areas. *Hydrological Sciences Journal*, 65, pp. 1096 - 1111. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1729984>.
- FIDEM – FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE. (1987). Secretaria de Planejamento, Governo do Estado de Pernambuco.
- FONSECA NETO, G.C.; SILVA JUNIOR, M.A.B.; RODRIGUES, A.B.; RIBEIRO NETO, A.; CABRAL, J.J.S.P. (2020). Modelagem Bidimensional para a Verificação Hidráulica da Canalização de um Trecho do Rio Frágoso em Olinda (Pernambuco, Brasil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v.13, n.6, p. 2963-2977.
- GOMES, M. A.; DE VERÇOSA, L. M.; CIRILO, J. (2021). Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. *Natural Hazards*, 108, pp. 3121 - 3157. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04817-3>.
- GOMES, M. M. A.; VERÇOSA, L.F.; CIRILO, J.A. (2021). Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. *Natural Hazards*, v.108, n. 3, p. 3121-3157.
- HAMEED, L., & ALI, S. (2013). Estimating of Manning's Roughness Coefficient for Hilla River through Calibration Using HEC-RAS Model. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7.
- HUANG, Q., WANG, J., LI, M., FEI, M., & DONG, J. (2017). Modeling the influence of urbanization on urban pluvial flooding: a scenario-based case study in Shanghai, China. *Natural Hazards*, 87, 1035-1055. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2808-4>.
- ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. (2018). Atlas dos manguezais do Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Brasília.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. IPCC Sixth Assessment Report.
- ITAGAKI, O.; BERMUDEZ, D.B.S.; ZEMMOTO, T.; OHARA, M. (2021). Proposal of a method for assessing combined flood risk reduction effect by hazard control measures and exposure reduction measures based on limited data. *Journal of Flood Risk Management*, v.14, n. 3, p. 1-15.

- JAMES, R.; FINNEY, K.; PERERA, N.; JAMES, B.; PEYRON, N. (2013). SWMM5/PCSWMM Integrated 1D-2D Modeling. Fifty Years of Watershed Modeling - Past, Present and Future . Engineering Conferences International.
- KHANAM, M., SOFIA, G., KOUKOULA, M., LAZIN, R., NIKOLOPOULOS, E., SHEN, X., & ANAGNOSTOU, E. (2021). Impact of compound flood event on coastal critical infrastructures considering current and future climate. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. <https://doi.org/10.5194/NHESS-21-587-2021>.
- KIRKPATRICK, J., & OLBERT, A. (2020). Modelling the effects of climate change on urban coastal-fluvial flooding. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.166>.
- KULP, S.A.; STRAUSS, B.H. (2019). New elevation data triple estimates of global vulnerability to sea-level rise and coastal flooding. *Nature Communications*, v.10, n. 4844, p. 1-12.
- LIAN, J., XU, H., XU, K., & MA, C. (2017). Optimal management of the flooding risk caused by the joint occurrence of extreme rainfall and high tide level in a coastal city. *Natural Hazards*, 89, 183-200. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2958-4>.
- LU, W.; XIA, W.; SHOEMAKER, C.A. (2022). Surrogate Global Optimization for Identifying Cost-Effective Green Infrastructure for Urban Flood Control With a Computationally Expensive Inundation Model. *Water Resources Research*, v.58, n.4, p. 1-23.
- MARENGO, J.A. (2017). Relatório Especial do Painel e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas.
- MARSOOLI, R., LIN, N., EMANUEL, K., & FENG, K. (2019). Climate change exacerbates hurricane flood hazards along US Atlantic and Gulf Coasts in spatially varying patterns. *Nature Communications*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11755-z>.
- MELO, M. J. V. de. (2007). Medidas estruturais e não-estruturais de controle de escoamento superficial aplicáveis na Bacia do Rio Fragoso na cidade de Olinda. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologias e Geociências. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife-PE, 172 f. 2007.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARNEL, R.D.; VEITH, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 50, n. 3, p. 885–900.
- MUIS, S., VERLAAN, M., WINSEMIUS, H., AERTS, J., & WARD, P. (2016). A global reanalysis of storm surges and extreme sea levels. *Nature Communications*, 7. <https://doi.org/10.1038/ncomms11969>.
- MUNAR, A., CAVALCANTI, J., BRAVO, J., FAN, F., MOTTA-MARQUES, D., & FRAGOSO, C. (2018). Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2018.07.045>.
- NOVAES, F. (1990). Olinda: evolução urbana. Recife, FUNDARPE.

- PASQUIER, U., HE, Y., HOOTON, S., GOULDEN, M., & HISCOCK, K. (2018). An integrated 1D–2D hydraulic modelling approach to assess the sensitivity of a coastal region to compound flooding hazard under climate change. *Natural Hazards*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/S11069-018-3462-1>.
- PAZ, A.; SERRA, L.; DE FREITAS SILVA, M.; MELLER, A. (2016). Reducing Computational Runtime of Two-Dimensional Urban Inundation Model by Dynamic Domain Reshaping. *Journal of Hydrologic Engineering*, 21, pp. 04016013-04016013. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001375](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001375).
- PE3D - PERNAMBUCO TRIDIMENSIONAL. (2023). Mapeamento do Território Pernambucano. Agência Pernambucana de Águas e Climas – APAC.
- PROJETO MAPBIOMAS. (2022). Coleção 4 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil.
- ROSSMAN, L.A.; HUBER, W.C. (2016). Storm Water Management Model Reference Manual. Cincinnati: National Risk Management Laboratory Office of Research and Development U.S Environmental Protection Agency, v. 1, p. 0-233.
- SADLER, J., GOODALL, J., BEHL, M., BOWES, B., & MORSY, M. (2020). Exploring real-time control of stormwater systems for mitigating flood risk due to sea level rise. *Journal of Hydrology*, 583, 124571. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124571>.
- SANTOS, L. L. (2009). Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 2, n. 3, p. 1-19.
- SHEN, Y., MORSY, M., HUXLEY, C., TAHVILDARI, N., & GOODALL, J. (2019). Flood risk assessment and increased resilience for coastal urban watersheds under the combined impact of storm tide and heavy rainfall. *Journal of Hydrology*, 579, 124159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124159>.
- SOOMRO, S., HU, C., BABAR, M., & AAMIR, M. (2021). Estimation of Manning’s Roughness Coefficient Through Calibration Using HEC-RAS Model: A Case Study of Rohri Canal, Pakistan. *American Journal of Civil Engineering*, 9, 1. <https://doi.org/10.11648/J.AJCE.20210901.11>.
- SOUZA, C. M., SHIMBO, J. Z., ROSA, M. R., PARENTE, L. L., ALENCAR, A. A., RUDORFF, B. F. T., HASENACK, H., MATSUMOTO, M., FERREIRA, L. G., SOUZA-FILHO, P. W. M., DE OLIVEIRA, S. W., ROCHA, W. F., FONSECA, A. V., MARQUES, C. B., DINIZ, C. G., COSTA, D., MONTEIRO, D., ROSA, E., VÉLEZ-MARTIN, E., AZEVEDO, T. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- STRAHLER, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 913–920.
- TAKAGI, H., TY, T., THAO, N., & ESTEBAN, M. (2015). Ocean tides and the influence of sea-level rise on floods in urban areas of the Mekong Delta. *Journal of Flood Risk Management*, 8. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12094>.

TANG, B., & GALLIEN, T. (2023). Predicting Compound Coastal Flooding in Embayment-Backed Urban Catchments: Seawall and Storm Drain Implications. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse11071454>.

TONELLO, K.C.; DIAS, H.C.T.; SOUZA, A.L.; RIBEIRO, C.A.A.S.; LEITE, F.P. (2006). Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhões – MG. *Revista Árvore, Viçosa – MG*, V.30, n.5, p. 849-857.

USACE - UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. (2016). HEC-RAS User's Manual. HEC-RAS River Analysis System.

VAN LIEW, M. W.; VEITH, T.L.; ARNOLD, J.G. (2007). Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal Of Hydrologic Engineering*, v. 12, n. 2, p.173-189.

WENCHAO, Q.I.; CHAO, M.A.; HONGSHI, X.U.; ZIFAN CHEN, K.; ZHAO; HAO HAN. (2021). A review on applications of urban flood models in flood mitigation strategies. *Natural Hazards*, 108, 31 - 62. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04715-8>.

ZAPPA, M. (2002). Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. *Swiss Federal Institute of Technology, Zurich*, 167p.

ZHOU, Q.; LENG, G.; SU, J.; REN, Y. (2019). Comparison of urbanization and climate change impacts on urban flood volumes: Importance of urban planning and drainage adaptation. *The Science of the total environment*, 658, 24-33 . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.184>.