

MODELAGEM HIDRÁULICA APLICADA À ANÁLISE DE RISCOS DE INUNDAÇÃO EM ÁREAS URBANAS BRASILEIRAS: O CASO DA ZONA ESPECIAL DE INTERESSE SOCIAL (ZEIS) DO LAGAMAR, FORTALEZA (NORDESTE DO BRASIL)

Edmundo Rodrigues de Brito

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
edrodriguez86@gmail.com

Frederico de Holanda Bastos

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
fred.holanda@uece.br

Abner Monteiro Nunes Cordeiro

Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
Departamento de Geografia (CERES/UFRN), Caicó, RN, Brasil
abnermncordeiro@gmail.com

Ícaro Breno da Silva

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
icarobrenos@hotmail.com

Davis Pereira de Paula

Universidade Estadual do Ceará,
Programa de Pós-Graduação em Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
davis.paula@uece.br

Rodrigo Guimarães de Carvalho

Universidade do Estado do Rio Grande do Norte,
Departamento de Gestão Ambiental (FACEM), Mossoró, RN, Brasil
rodrigocarvalho@uern.br

Hildebrando dos Santos Soares

Universidade Estadual do Ceará,
Reitoria da Universidade Estadual do Ceará
Fortaleza, CE, Brasil
reitor@uece.br

RESUMO

Os processos de urbanização no Brasil foram responsáveis pela formação de grandes cidades, com marcante desigualdade socioespacial e sem o adequado ordenamento territorial, tendo como resultado inúmeros adensamentos populacionais de elevada vulnerabilidade social situados em áreas de riscos naturais. O presente trabalho analisou a suscetibilidade a eventos de inundação na Zona Especial de Interesse Social do (ZEIS) do Lagamar, situado na cidade de Fortaleza, Nordeste do Brasil. Foi aplicada uma modelagem hídrica no trecho do baixo curso do Riacho São João do Tauape visando identificar as áreas de maior suscetibilidade a eventos de inundação, contribuindo com estratégias de ordenamento territorial e regularização fundiária urbana. Para isso, foram utilizadas séries históricas da pluviometria da área, inseridas em modelos hidrológicos (HEC-HMS e HEC-RAS) integrados aos SIGs. O mapeamento gerado mostrou que todas as áreas analisadas ao longo da ZEIS possuem habitações em área de risco de inundação nos diferentes períodos de retorno dos eventos de precipitação máxima com intervalos de 10, 25 e 100 anos. Os resultados obtidos demonstraram o grande potencial da integração das ferramentas de geoprocessamento e modelagem hidrológica no auxílio do planejamento territorial e na tomada de decisão dos gestores municipais.

Palavras-chave: Modelo hídrico. HEC-HMS. Geoprocessamento.

HYDRAULIC MODELLING APPLIED TO FLOOD RISK ANALYSIS IN BRAZILIAN URBAN AREAS: THE CASE OF THE LAGAMAR SPECIAL ZONE OF SOCIAL INTEREST (ZEIS), FORTALEZA (NORTHEAST BRAZIL)

ABSTRACT

The process of urbanisation in Brazil has been a significant contributing factor to the formation of large cities with marked socio-spatial inequality. This has occurred alongside a lack of adequate land-use planning, resulting in numerous population densities of high social vulnerability located in areas of natural risk. This study examined the vulnerability to flooding events in the Lagamar Special Social Interest Zone (ZEIS), situated in the city of Fortaleza in north-eastern Brazil. The objective of the water modelling applied to the lower stretch of the São João do Tauape creek was to identify the areas most susceptible to flooding events. This will contribute to the development of land-use planning strategies and the regularisation of urban land titles. To achieve this, historical rainfall series for the area were employed, integrated with GIS and inserted into hydrological models (HEC-HMS and HEC-RAS). The mapping exercise revealed that all the areas under consideration within the ZEIS are at risk of flooding during the different return periods of the maximum rainfall events, with intervals of 10, 25 and 100 years. The results demonstrated the significant potential of integrating geoprocessing tools and hydrological modelling to support territorial planning and decision-making by municipal managers.

Keywords: Water model. HEC-HMS. Geoprocessing.

INTRODUÇÃO

O atual contexto de mudanças climáticas tem sido responsável por uma maior ocorrência de eventos extremos nas últimas décadas (Painter et al., 2021), com sérios danos socioeconômicos em áreas urbanas (Nissen; Ulbrich, 2017), sobretudo em contextos climáticos tropicais em países subdesenvolvidos (Antônio, 2023).

O Brasil é marcado por um intenso processo de urbanização ao longo do século XX que foi responsável pela expansão de grandes cidades sem o devido planejamento urbano, resultando em marginalização social, irregularidades fundiárias e desigualdades socioeconômicas (Santos, 2008). Estes fatores favorecem a configuração de inúmeras áreas de risco ambiental (Carvalho; Rocha, 2020).

Situada no litoral setentrional da região Nordeste do Brasil, Fortaleza é a quarta cidade mais populosa do país com 2,7 milhões de habitantes (IBGE, 2022) e teve a produção do seu espaço urbano marcado por intensa desigualdade socioespacial, protagonizada pela iniciativa privada e com insuficiente regulação estatal (Pequeno, 2008). Esse sítio urbano situa-se sobre depósitos sedimentares cenozoicos, cuja topografia tabular condiciona a ocorrência de extensas áreas de riscos de inundação, sobretudo nas áreas de baixos cursos fluviais (Souza, 2009; Marques; Lima; Santos, 2020).

Na legislação brasileira, o Estatuto das Cidades (Lei Federal no 10.257/2001) estabelece que as estratégias de ordenamento territorial urbano são de competência dos municípios, através da criação de seus planos diretores, visando o desenvolvimento sustentável municipal (Pereira; Sousa-Junior; Vieira, 2022). De acordo com o Plano Diretor Municipal de Fortaleza (Lei Municipal no 62/2009), este município possui 12 Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS), que são áreas caracterizadas pela irregularidade fundiária, precariedade das infraestruturas, desordem urbanística, condição de pobreza e densidade populacional excessiva (Souza, 2001).

No Brasil, as inundações têm sido responsáveis, nos últimos 30 anos, por danos sociais e econômicos diversos, com desastres que resultaram em mais de 3.000 mortes e 7,5 milhões de pessoas afetadas, entre desalojados e desabrigados (EM-DAT, 2020), ocupando lugar de destaque nas problemáticas ambientais brasileiras (Peiter, 2012; Tominaga; Santoro; Amaral, 2009).

O conceito de suscetibilidade (Kottow, 2003) tem fornecido subsídios para o entendimento dos fenômenos de inundação e adoção de estratégias de ordenamento territorial em espaços urbanos (Santos, 2012). Em tais termos, a suscetibilidade está relacionada ao grau de estabilidade (Vedovello; Macedo, 2007) de áreas

afetadas pela ocorrência de fenômenos ambientais. Assim, a suscetibilidade trata das diferentes probabilidades ou intensidades que um determinado impacto ambiental acarretará (Cajazeiro, 2012; Lima, 2010).

Sua correlação com os conceitos de Risco, Perigo e Vulnerabilidade (Blaikie et al., 1994; Marandola; Hogan, 2004) se dá ao considerar que o risco seria a percepção de um indivíduo – ou grupo – da probabilidade de ocorrência de perdas de vidas ou bens (Castro; Peixoto; Pires do Rio, 2005; Esteves, 2011; Veyret, 2007), por ocorrência de um perigo, ou seja, uma ameaça potencial (Cutter, 1996; Smith, 2001) que se materializaria de acordo com a vulnerabilidade desse indivíduo ou comunidade (Macedo et al., 2015; Medeiros, 2014; Umbelino, 2006).

Para análise, estratégias de ocupação, prevenção de desastres naturais, enfrentamento e mitigação desses impactos em áreas urbanas, tem se intensificado o uso de ferramentas de SIG (Coelho, 2016; Ferraz et al., 1998, Monteiro; Kobiyama, 2013; Rego et al., 2012), orientando o desenvolvimento das cidades e buscando garantir a segurança das comunidades (Grassi et al., 2013). Nesse contexto, a modelagem se destaca enquanto representação de um sistema real por meio de equações, buscando simular seu comportamento em resposta a estímulos. Essa representação é influenciada pela perspectiva e conhecimento do modelador, o que permite múltiplas abordagens para um mesmo fenômeno (Christofolletti, 1999; Tucci, 2010).

A classificação de modelos pode ser realizada sob diversos critérios, incluindo a natureza das variáveis (estocásticas ou determinísticas), o tipo de relações modeladas (empíricas ou conceituais), a escala de medida das variáveis (discretas ou contínuas), a estrutura espacial dos dados (concentrados ou distribuídos) e a presença de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (Moreira, 2005).

É importante ressaltar que essa classificação não é exaustiva e que um mesmo modelo pode apresentar características de diferentes categorias. Além disso, a escolha do modelo depende de diversos fatores, como a disponibilidade de dados, a complexidade do sistema a ser modelado e o objetivo da análise.

Face ao exposto, o presente artigo visa a modelagem hídrica no trecho do baixo curso do rio Tauape, situado na ZEIS do Lagamar, em Fortaleza, sob uma perspectiva que mescla elementos de tipos variados de modelos, considerando as características estocásticas (precipitação x vazão), determinísticas (escoamento em canal), dinâmicas (evolução no tempo) e de variáveis mistas (discretas e contínuas), visando identificar as áreas de maior suscetibilidade a eventos de inundação, contribuindo com estratégias de ordenamento territorial e regularização fundiária urbana.

MATERIAIS E MÉTODOS

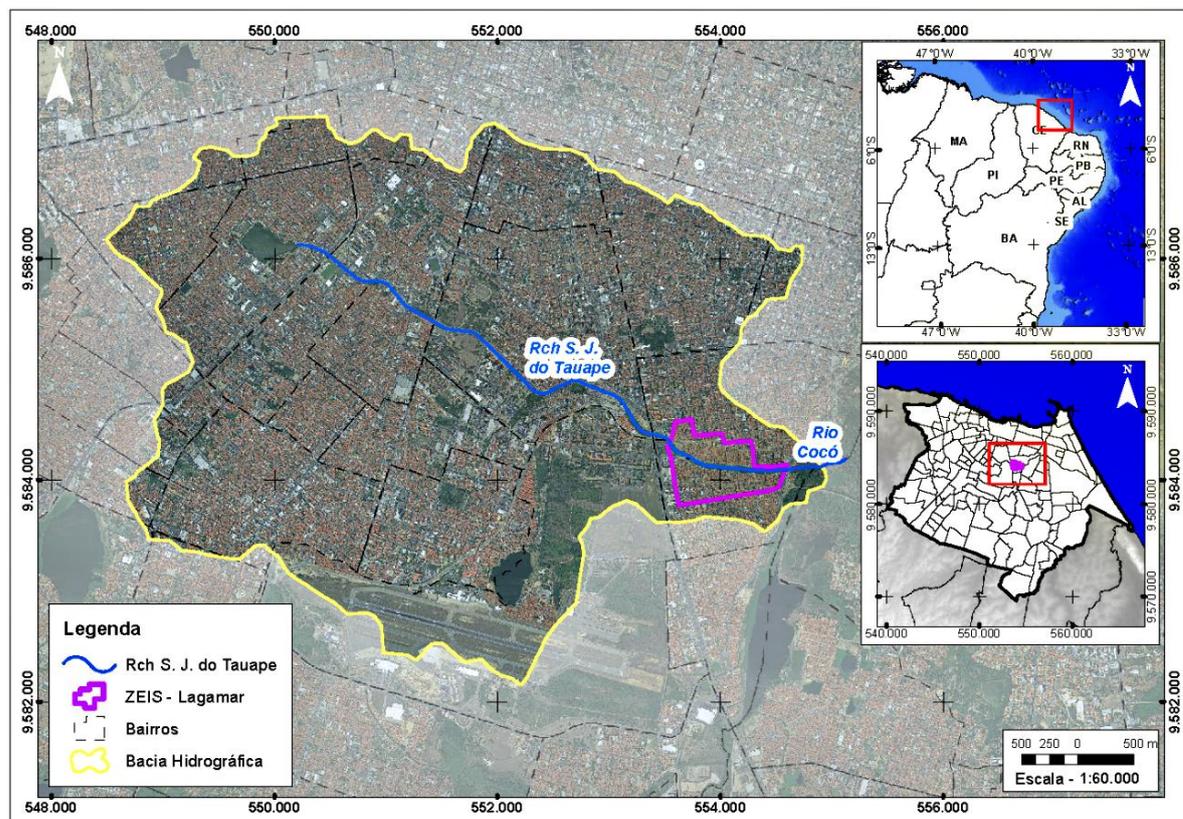
Área de estudo

A ZEIS do Lagamar se localiza na foz do riacho São João do Tauape (Canal do Lagamar), que representa o último afluente da margem esquerda do rio Cocó, já em seu setor estuarino, encontrando-se em uma área de transição entre os tabuleiros pré-litorâneos e a planície fluviomarinha do rio Cocó (Pinéo et al., 2021) (Figura 1).

Essa área apresenta altitudes que variam de 2 a 16 m, com predomínio de cotas inferiores a 6 m (Figura 2). Tais aspectos topográficos se relacionam à proximidade com o nível de base e, conseqüentemente, com a foz do rio Cocó. Portanto, verificam-se pequenas amplitudes altimétricas entre o talvegue do riacho São João do Tauape e os interflúvios, constituindo uma topografia tabular no contexto geral da área, com declives inferiores a 3°.

Do ponto de vista geológico e geomorfológico essa área é caracterizada como uma planície de deposição de sedimentos de textura siltico-argilosa (silte e argila) (Fortaleza, 2020; Pinéo et al., 2021), tendo em vista a pequena capacidade energética da rede de drenagem face ao reduzido gradiente topográfico.

Figura 1 - Fortaleza (CE): Mapa de localização da bacia hidrográfica, 2024



Elaboração: Os autores, 2024.

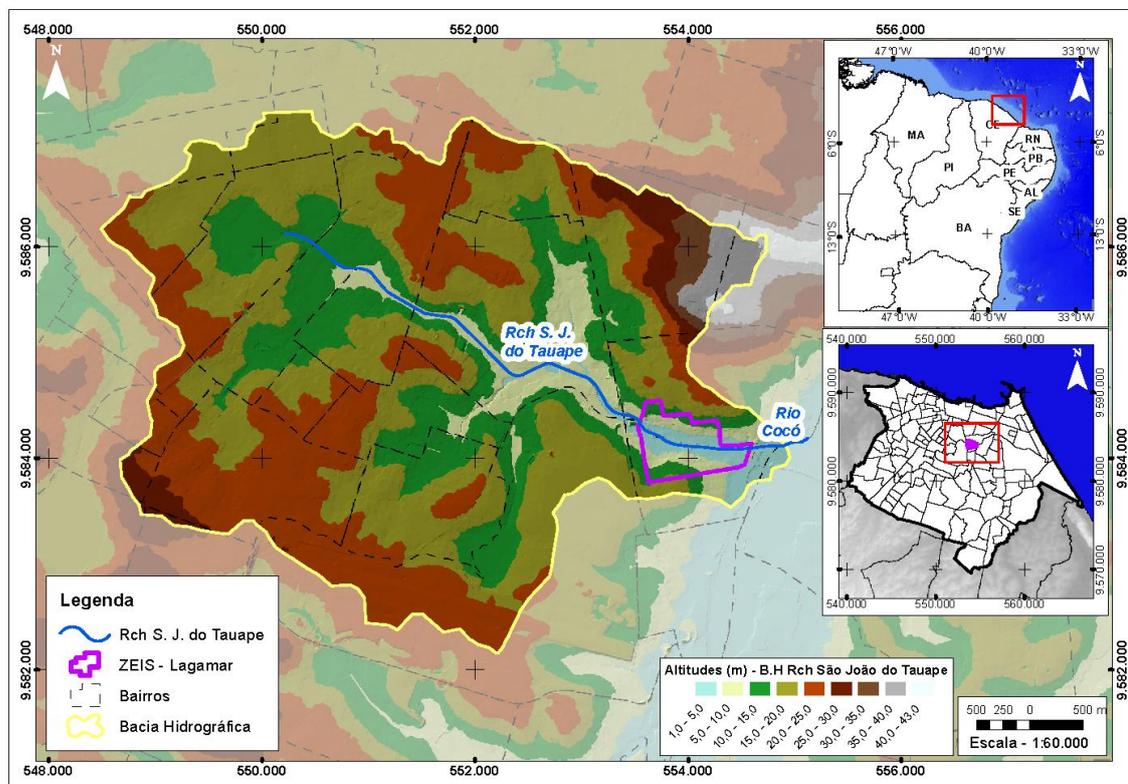
O riacho São João do Tauape, com 5,27 km de extensão se desenvolveu na direção E (direção do fluxo), na área da ZEIS do Lagamar, dissecando os sedimentos da Formação Barreiras (Cavalcante et al., 2003), constituindo interflúvios tabulares nas margens esquerda e direita do referido canal fluvial. Esse curso fluvial é responsável pela drenagem de uma área urbanizada de $\approx 22 \text{ km}^2$ - sub bacia do Rio Cocó - que recebe a denominação de “canal do Lagamar” ou “canal do Tauape”, com a presença de estruturas de concreto canalizando o leito original, a qual alterou a morfologia original do perfil transversal, assim como a dinâmica sedimentológica fluvial.

Na área da ZEIS do Lagamar, a canalização do leito de vazão do riacho São João do Tauape, associada à ocupação/impermeabilização do leito maior pela urbanização tem potencializado a reincidência de eventos de inundação, principalmente, aqueles associados a eventos chuvosos extremos. Ocupando uma significativa parcela dos bairros São João do Tauape (30.421 hab.) e Alto da Balança (14.123 hab.) (Fortaleza, 2024), a população da ZEIS do Lagamar já testemunhou diversos eventos de inundação.

As médias pluviométricas anuais da cidade de Fortaleza são de 1.440 mm, dos quais cerca de 70% ocorrem entre os meses de janeiro e maio (FUNCEME, 2023). Esse contexto pluviométrico associado às condições topográficas, a impermeabilização dos solos pelo processo de urbanização e o precário sistema de drenagem, cria um cenário favorável a eventos de inundação.

Os eventos chuvosos extremos em Fortaleza possuem um histórico de registros, desde meados de 1970, que apontam que a maior chuva registrada, em termos de milímetro em 24 horas, foi em 29/01/2004, com 250 mm (Diário do Nordeste, 2024), seguidos pelos registros de 23/06/2012, com 197,6 mm, 27/03/2012, com 197,5 mm, e 20/03/1988, com 189 mm (Monteiro, 2016). Diversos eventos de inundação, ao longo da área, em condições similares de precipitação, já foram evidenciados pelos veículos de comunicação locais (Diário do Nordeste, 2011; G1 CE, 2019; O Povo, 2019).

Figura 2 - Fortaleza (CE): Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica, 2024



Elaboração: Os autores, 2024.

Portanto, tendo em vista as características topográficas da ZEIS do Lagamar e o comportamento da pluviosidade, pode-se afirmar que a mesma se trata de uma área de grande risco natural, associada com eventos pluviométricos extremos. Como se trata de área estuarina, seus solos são caracterizados pela baixa capacidade de drenagem, que fazem com que estejam constantemente sujeitos à oscilação do nível freático ou até mesmo de marés.

Aquisição de dados

O estudo de chuvas intensas se baseou nos dados pluviométricos disponíveis no Posto Pluviométrico Castelão, com registros que datam de 1989 a 2023 (34 anos). As séries pluviométricas utilizadas são originárias de postos existentes na região, identificados através de consultas ao Inventário de Dados Hidrometeorológicos da Agência Nacional de Águas – ANA, Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME, entre outros portais de livre acesso.

Para a elaboração do modelo digital de terreno, obtiveram-se as curvas de nível oriundas de levantamento aerofotogramétrico, com altimetria aferida por perfilador a LASER, em escala 1:1.000 e equidistância de 1 m, contando com 62 marcos e monografias topográficas de apoio e correção materializados em campo. Os dados foram elaborados em 2016 e disponibilizado pela Secretaria de Finanças de Fortaleza – SEFIN.

Análise de risco de inundação

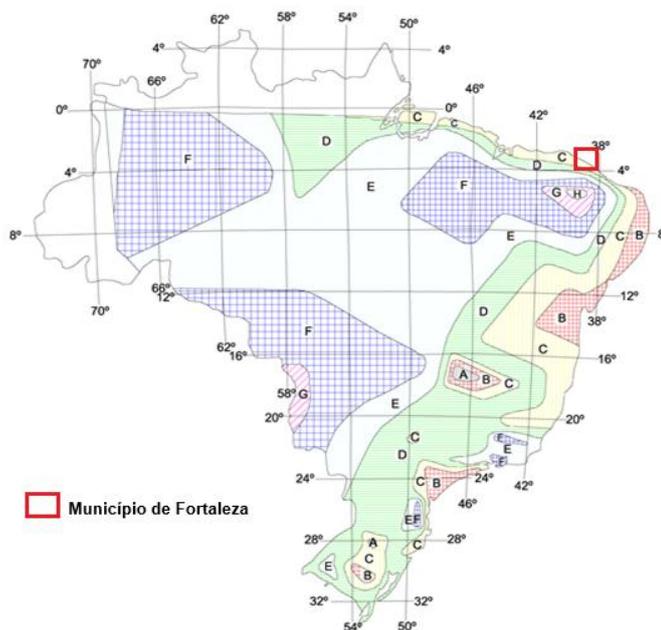
O mapeamento das áreas de perigo à inundação seguiu de acordo com o proposto por Cabral et al. (2016), considerando a utilização de técnicas de geoprocessamento na extração de dados característicos da bacia hidrográfica e da drenagem (Câmara; Medeiros, 1998), associados à

modelagem hidrológica, estabelecendo diferentes gradações de suscetibilidade a eventos de inundação.

A partir das séries históricas dos postos pluviométricos analisados foram aplicados métodos estatísticos baseados nas leis da probabilidade (Tucci, 1987), de maneira a estabelecer as variações em riscos calculados, fundamentando os tempos de recorrência e as chuvas de projeto adotadas nas simulações. As distribuições estatísticas comumente aplicadas são: Gama, Transformação Logarítmica da distribuição Gama, Distribuições exponenciais; Distribuição gaussiana; e Transformação logarítmica da distribuição normal ou distribuição de Galton (Barbosa et al., 2005), sendo esta última a distribuição adotada, por ter apresentado melhor ajuste ao teste de aderência Qui Quadrado (Silvino et al., 2007; Leotti et al., 2012).

A aplicação de métodos de transformação de chuva em deflúvio para estudos de cheia exige como dado de entrada o comportamento da chuva ao longo de sua duração, incluindo sua desagregação em intervalos de tempo inferiores ao diário. Uma vez definidas as chuvas máximas, a regionalização se deu através do método de Tborga Torrico (1974). Esse método, comumente utilizado (Tiburcio; Castro, 2002; Basso et. al., 2014; Santos, 2015; Lima Neto et al., 2018; Horta et al., 2021), estabelece Isozonas no Brasil (Figura 3) para as quais são definidos coeficientes (Tabela 1) a serem aplicados para desagregação de chuva em intervalos sub diários, com precipitações divididas em blocos alternados.

Figura 3 - Mapa de Isozonas para aplicação do método de Tborga Torrico na desagregação da precipitação diária



Fonte: Adaptado de Tucci (2000).

O município de Fortaleza se encontra na isozona C, de tal maneira que utilizando os coeficientes por interpolação, foram obtidos os valores de precipitação, para o posto pluviométrico estudado, aos intervalos de 15, 30 e 45 minutos, 1, 2, 6, 12 e 24 horas e para os períodos de retorno de 5, 10, 15, 25, 50 e 100 anos, como definido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte DNIT (2006) para obras urbanas.

Kobiyama e Monteiro (2013) indicam que os valores de períodos de retorno podem ser alterados de acordo com o interesse do estudo em questão. Assim, foram plotados no mapa os resultados referentes

aos tempos de recorrência de 5, 25 e 100 anos, por apresentarem melhor capacidade de representação gráfica nas escalas adotadas nos mapeamentos.

Tabela 1 - Relações entre a chuva diária e as chuvas de duração de 24 horas, 1 hora e 6 minutos para diferentes zonas

Zona	Relação 1h/24hrs						Relação 6min/24hrs				
	TR 05 anos	TR 10 anos	TR 15 anos	TR 20 anos	TR 30 anos	TR 50 anos	TR 100 anos	TR 1000 anos	TR 10000 anos	TR 05-50 anos	TR 100 anos
A	36,20%	35,80%	35,60%	35,50%	35,30%	35,00%	34,70%	33,60%	32,50%	7,00%	6,30%
B	38,10%	37,80%	37,50%	37,40%	37,20%	36,90%	36,60%	35,40%	34,30%	8,40%	7,50%
C	40,10%	39,70%	39,70%	39,30%	39,10%	38,80%	38,40%	37,20%	36,00%	9,80%	8,80%
D	42,00%	41,60%	41,40%	41,20%	41,00%	40,70%	40,30%	39,90%	37,80%	11,20%	10,00%
E	44,00%	43,60%	43,30%	43,20%	42,90%	42,60%	42,20%	40,90%	39,60%	12,60%	11,20%
F	46,00%	45,50%	45,30%	45,10%	44,80%	44,50%	44,10%	42,70%	41,30%	13,90%	12,40%
G	47,90%	47,40%	47,20%	47,00%	46,70%	45,40%	45,90%	44,50%	43,10%	15,40%	13,70%
H	49,90%	49,40%	49,10%	48,90%	48,60%	48,30%	47,80%	46,30%	44,80%	16,70%	14,90%

Fonte: Adaptado de Tucci (2000).

A aplicação da metodologia de Taborga Torrico (1974) resulta na obtenção de valores de chuvas extremas, associadas a um ponto referente ao local do posto pluviométrico. No entanto, devido a variabilidade espaço temporal das precipitações, a precipitação pontual não pode ser extrapolada para áreas extensas. Isto se deve principalmente ao fato de que a lâmina precipitada não é uniforme em uma bacia hidrográfica, apresentando maior variabilidade quanto maior for a área da mesma; e dado que os picos de precipitação em postos adjacentes dificilmente ocorrem no mesmo instante, especialmente no Nordeste Setentrional, onde se observa elevada variabilidade temporal da chuva.

Portanto, visando considerar o efeito de atenuação da precipitação com o aumento da área, se necessário, utiliza-se o método proposto pelo National Weather Service (EUA) para a correção da precipitação associada a um posto pluviométrico, representativa de uma área de até 25 km², para uma precipitação média sobre uma bacia hidrográfica extensa (TUCCI 2000). Considerando que a extensão bacia hidrográfica do Riacho São João do Tauape, abrange área de 21,04km², o método de atenuação da precipitação encontra aplicabilidade.

Dessa forma, se aplica a equação 1:

$$FC = 1 - BV[1 - \exp(-0,015 \cdot A_m)] \quad (1)$$

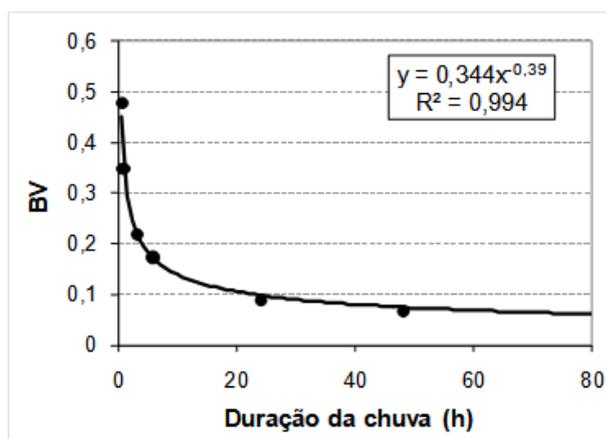
- FC – fator de correção para ajuste de precipitação pontual;
- BV – máxima redução da precipitação pontual (valor tabelado);
- Am – área da bacia (milhas quadradas)

A máxima redução da precipitação pontual é valor tabelado e depende da duração da precipitação (Figura 4).

A conversão de precipitação em deflúvio se deu com a utilização do método racional e o modelo HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center / Hydrologic Modeling System, na versão 4.1 – (USACE, 2010). Para tanto, a análise das características da bacia hidrográfica na modelagem do comportamento da separação das parcelas de chuva que infiltram e escoam superficialmente, fundamentou a adoção da metodologia recomendada pelo Soil Conservation Service (Nunes e Fiori, 2007), o "Método da Curva

Número", cujo valor médio é verificado através da correlação entre o tabelado e a análise de imagens de satélite, sendo consistido em visitas de campo. Além disso, o SCS Unit Hydrograph (USACE, 2010) para determinação dos hidrogramas, considerando o tempo de retardo (Tlag), comprimento do rio em análise, desnível desde sua nascente a foz e área da bacia, cuja área permitiu análise da atenuação da precipitação.

Figura 4 - Coeficiente BV em função da duração da precipitação



Fonte: Adaptado de Tucci (2000).

A modelagem hidráulica se deu através do Hydrologic Engineering Center – River Analysis System – HEC-RAS – (USACE, 2010) e da extensão GeoRAS, para ArcMAP, correlacionando os dados hidrológicos e fisiográficos que constituem o modelo. Foi adotado o espaçamento entre seções transversais de 120m e assumido para as calhas e canal do riacho, um valor de rugosidade tabelado – coeficiente de Manning (n) – de 0,012, referente a uma superfície de argamassa de cimento em boas condições (Cirilo, 2012).

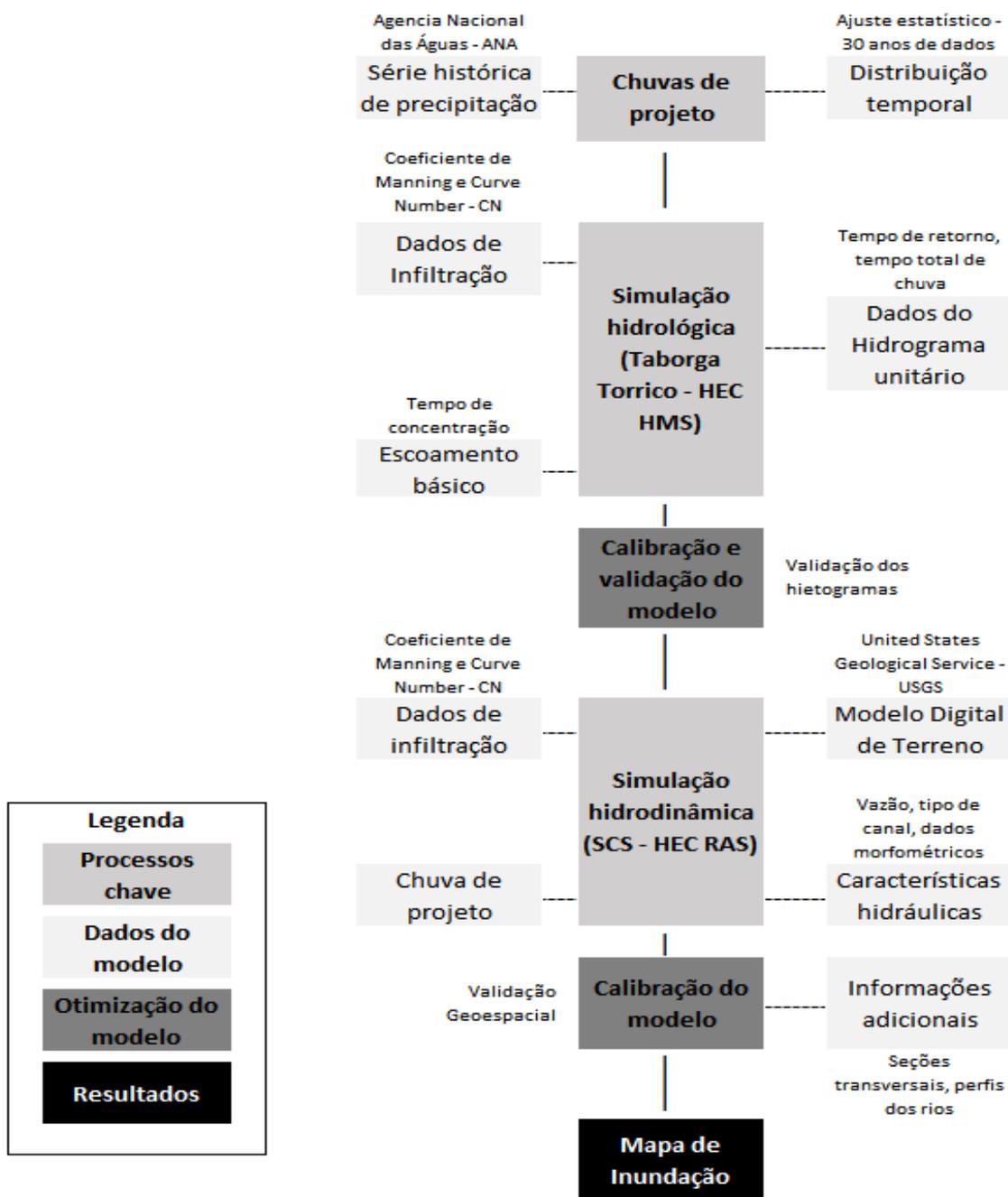
Por fim, calculados, os perfis de superfície d'água foram sobrepostos à topografia, com as cotas máximas de inundações por períodos de retorno. Foram estabelecidos três graus de suscetibilidade de acordo com os valores identificados, características ambientais da bacia, parâmetros hidroclimáticos adotados e a recorrência das precipitações.

- Suscetibilidade Alta/Constante: Porções territoriais inseridas na área máxima de inundação com período de retorno de 5 anos. Deve ser compreendida como de elevada suscetibilidade pois está sujeita à inundação, e todos os problemas associados, mediante precipitação considerada corriqueira, de acordo com o observado nas séries históricas.
- Suscetibilidade Média/Sazonal: Porções territoriais inseridas na área máxima de inundação com período de retorno de 25 anos. O enquadramento dessas áreas sugere que as mesmas podem sofrer impactos diretos em caso de uma precipitação que se repete com uma frequência moderada. Essa área também está sujeita a impactos indiretos devido seu contato com as áreas de elevada suscetibilidade, como a proliferação de doenças, acúmulo de detritos diversos, entre outras problemáticas.
- Suscetibilidade Baixa/Eventual: Porções territoriais inseridas na área máxima de inundação com período de retorno de 100 anos. Esse período de retorno identifica precipitações máximas seculares, intensas o bastante para causar danos consideráveis, mas de baixa frequência de ocorrência. Dessa forma a área de suscetibilidade demarca a área de alcance máximo de precipitação estimada e identifica os limites da área de vulnerabilidade a inundação do Riacho São João do Tauape.

A figura 5 apresenta o organograma do procedimento metodológico, baseado no proposto por Monteiro e Kobiyama (2013). Os procedimentos principais representam a “coluna vertebral metodológica”, pois

ligam todos processos físicos com o banco de dados para se obter o resultado final. Dessa forma, os outros itens listados garantem a minimização do erro ao final do processo de modelagem. Assim, a obtenção da Chuva de Projeto, as simulações Hidrológicas e Hidráulicas e o Mapeamento de Suscetibilidade se apresentam como os procedimentos metodológicos principais.

Figura 5 - Fluxograma de procedimentos metodológicos para suscetibilidade a inundação



Fonte: Adaptado de Monteiro e Kobiyama (2013).

RESULTADOS

Histórico pluviométrico e de inundações

Considerando o histórico pluviométrico fichado no Posto Castelão, observa-se uma média anual de 1.484,2 mm, pouco superior à média da cidade de Fortaleza de 1.448,0mm (FUNCEME, 2023). A maior chuva registrada data de janeiro de 2004, com 180,4mm precipitados. A tabela 02 apresenta os valores de precipitação aos tempos de recorrência, encontrados a partir de regressão estatística da série histórica de precipitações do Posto.

Tabela 2 - Fortaleza (CE): Precipitação em tempos de recorrência adotados

TR (anos)	Precipitação (mm)	Possibilidade de Ocorrência (%)
05	116,47	20
10	129,04	10
15	135,80	7
25	143,90	4
50	154,45	2
100	164,58	1

Fonte: Os autores (2024).

O tempo de retorno de 5 anos condiz com a precipitação com maior probabilidade de ocorrência (20%), já tendo sido fichada em igual ou maior intensidade, na série histórica do Posto Castelão em anos como 1991, 2003, 2004, 2006, e mais recentemente, em 2011 e 2019.

O tempo de retorno de 25 anos condiz com precipitações elevadas, de probabilidade de ocorrência consideravelmente baixa (7%), mas que já foram registradas precipitações iguais, superiores ou muito próximas desse valor, como nos anos de 1991, 2004 e em 2014. O valor estimado para o TR 25 é tomado como marco pluviométrico na modelagem das áreas de média suscetibilidade à inundação.

Para o tempo de recorrência de 100 anos, ou a cheia secular, a chuva de janeiro de 2004, com 180,4 mm é a única com intensidade superior a estimada estatisticamente. A estimativa da regressão estatística aponta uma probabilidade de 1% de ocorrência, reforçando os estudos a considerarem a concretude da sua repetição. O valor para tal tempo de recorrência foi adotado como marco pluviométrico na modelagem das áreas de baixa suscetibilidade

Parâmetros da modelagem hidrológica

Estabelecidos os valores base das precipitações, a conversão desses valores em deflúvio se deu considerando os aspectos da bacia hidrográfica. A tabela 3 apresenta os parâmetros e valores adotados e encontrados ao processo de conversão da precipitação em vazão, extraídos a partir da análise de Modelo Digital de Terreno (USGS 2020), equações estabelecidas em Tucci (2000) e os valores tabelados para Curve Number de acordo com o método SCS (Brito e Bastos, 2021).

Tabela 3 - Fortaleza (CE): Parâmetros para modelagem hidrológica

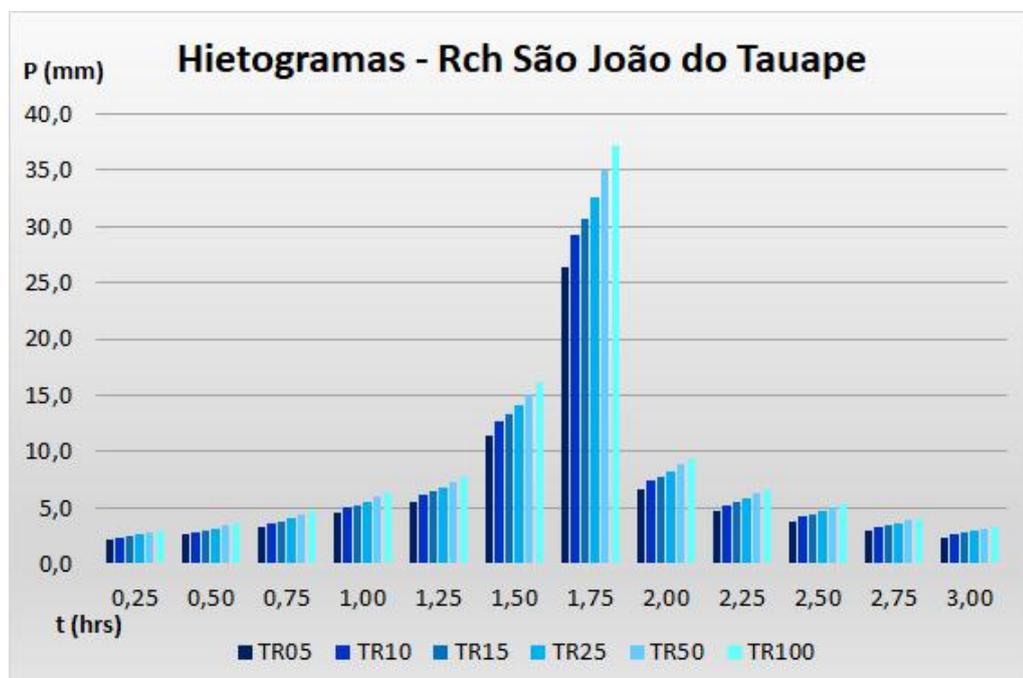
Bacia	Área (km ²)	Comprimento do Riacho (km)	Desnível (m)	Tempo de Retardo (min)	Tempo de Concentração (hrs)	Valor Médio de Curva Número (CN)
Rch. São João do Tauape	21,04	5,27	11,82	90,11	2,5	85

Fonte: Os autores (2024).

A bacia do Riacho São João do Tauape apresenta um valor de CN bem elevado devido a densidade de sua cobertura urbana, que chega a atingir 100%, uma vez que ocupa uma zona nuclear na cidade de Fortaleza. Todo o talvegue do riacho se encontra canalizado, desde o Poranguabussu até seu deságue no Rio Cocó, no bairro Lagamar, a 5,27 km de distância.

Os hietogramas para as chuvas de projeto adotadas na modelagem apresentam a distribuição das precipitações em função do tempo, determinado em 3 horas, com partilha em séries de 15min, de acordo com o tempo de concentração. O pico de precipitação se deu aos 105min após seu início, para todos os tempos de retorno, mas registrando máximas diferenciadas. A Figura 6 exibe os hietogramas ao TR's adotados no estudo.

Figura 6 - Fortaleza (CE): Hietogramas de projeto da bacia do Rch São João do Tauape para os TR's adotados, 2024



Fonte: Os autores (2024).

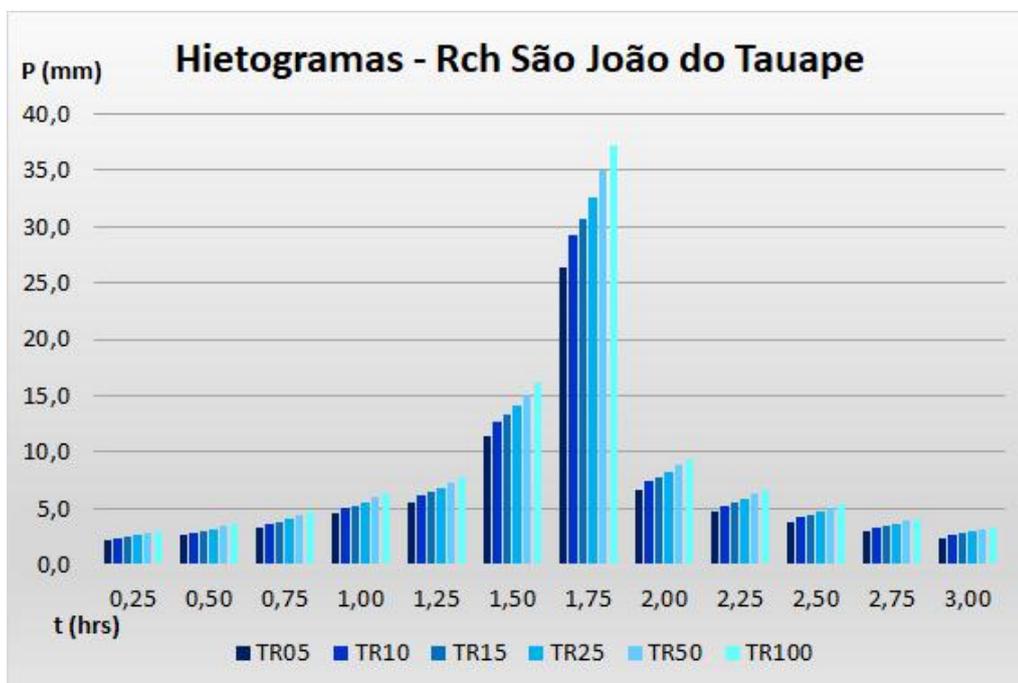
A conversão das precipitações em vazões de projeto resultou nos hidrogramas (Figura 7), que atuam em função das características fisiográficas das bacias na relação entre chuva e escoamento. Os hidrogramas exibem pico único, desconsideradas alterações abruptas na intensidade das precipitações ou uma sequência de chuvas intensas (Tucci, 2000).

Definidos os valores de precipitação e vazão, as cotas máximas de inundação foram aferidas a partir da correlação com o modelo digital de terreno. Foram estipuladas seções transversais equidistantes em 120 metros, resultando em 10 seções que cobriam o trecho do riacho que cruza a ZEIS Lagamar e que desagua no Rio Cocó, como observado na figura 08.

Ademais, considerou-se o fluxo do deflúvio como estável durante o período de precipitação adotado na modelagem hidrológica e foram desprezadas as possíveis cargas de sedimentos que poderiam acometer em alterações no resultado final, por menores que fossem, pela impossibilidade da análise em mensurar tais cargas no tocante do estudo.

A Tabela 4 apresenta o resumo da relação precipitação x deflúvio x cota de inundação para cada TR em análise encontrado pela modelagem.

Figura 7 - Fortaleza (CE): Hidrogramas de vazão de projeto da bacia do Rch São João do Tauape para os TR's adotados, 2024



Fonte: Os autores (2024).

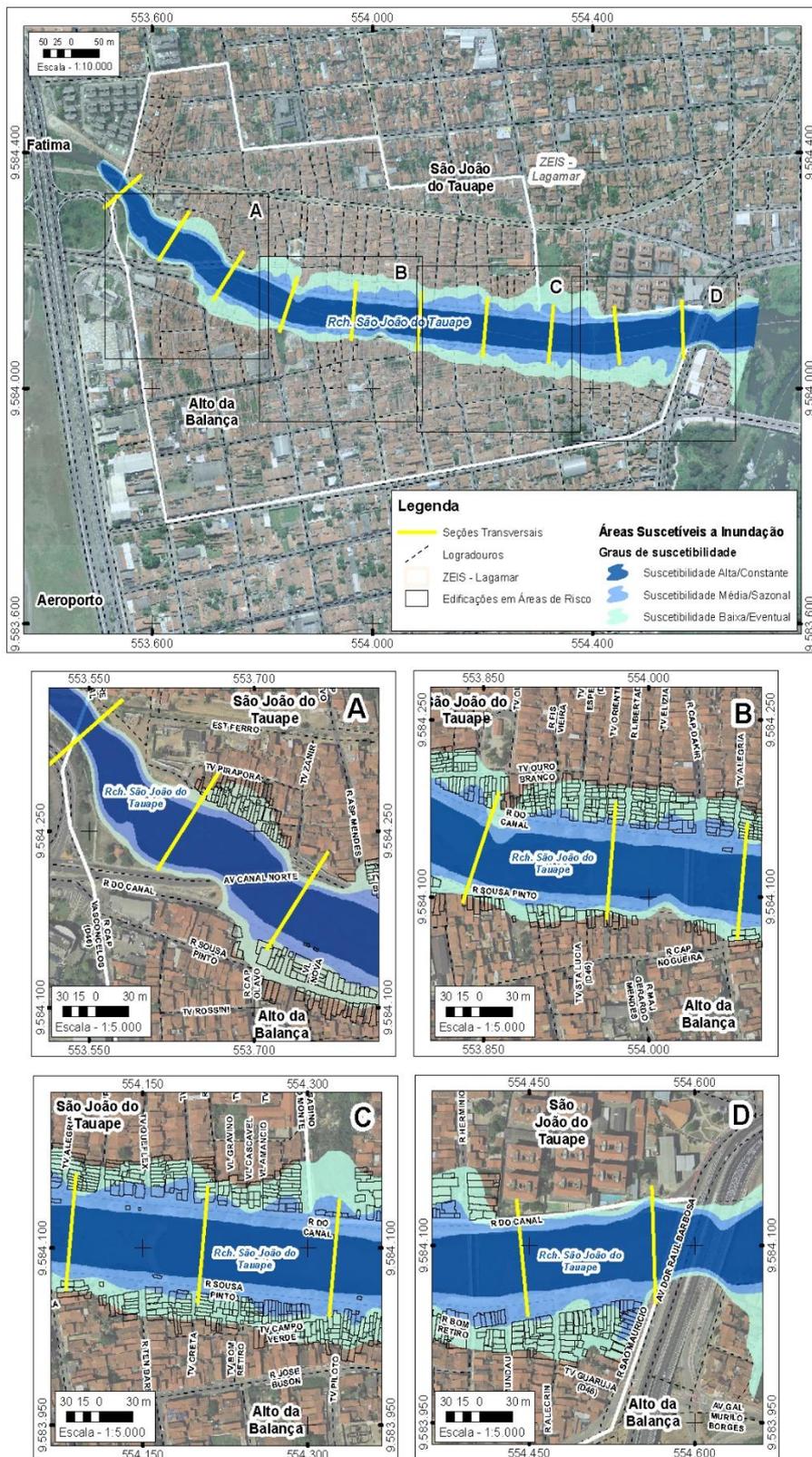
Tabela 4 - Fortaleza (CE): Máximas registradas de chuvas de projeto x deflúvio x cota de inundação aos tempos de recorrência adotados

Indicadores	Tempo de Recorrência (anos)					
	5	10	15	25	50	100
Precipitação (mm)	116,5	129,0	135,8	143,9	154,5	164,6
Vazão (m ³ /s)	91,0	107,0	115,8	126,4	140,3	153,9
Cota de Inundação (m)	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6

Fonte: Os autores (2024).

A Figura 8 apresenta a espacialização das áreas suscetíveis à inundação, considerando as cotas máximas modeladas para os tempos de retorno de 05, 25 e 100 anos, nas cores azul escuro, azul médio e azul ciano, respectivamente, com quadros de detalhe para cada trecho, identificando edificações passíveis de serem atingidas nas áreas de perigo de inundação. Dessa forma, o modelo sugere que para precipitações superiores àquelas observadas no TR 25, há tendência de ocorrência de inundações.

Figura 8 - Fortaleza (CE): Áreas de suscetibilidade à inundação na ZEIS Lagamar, 2024



Fonte: Os autores (2024).

DISCUSSÃO

Análise sobre o modelo aplicado

A modelagem ambiental se tornou uma importante ferramenta de identificação e análise das áreas de risco, permitindo que informações Multiproxy (e.g., precipitação, vazão, urbanização, solo, vegetação, tipo de ocupação) sejam integradas ao planejamento urbano e à gestão de desastres. Atualmente, diversos são os estudos que utilizam a modelagem hidrológica (Gomes et al., 2021; Zhou et al., 2021) e a cartografia (Bodoque et al., 2023) para representar espacialmente os riscos de inundação, contribuindo efetivamente para a elaboração de políticas públicas voltadas à redução desses riscos, especialmente em Núcleos Urbanos Inconsolidados (NUIs), como no caso da ZEIS do LAGAMAR.

O caso estudado remete a uma bacia hidrográfica urbana, onde as características naturais foram totalmente perdidas em decorrência do crescimento urbano desordenado da cidade de Fortaleza. Essa situação é comum aos centros urbanos dos países em desenvolvimento (Phouratsamay et al., 2024), cujo uso principal do solo é residencial. As atividades comerciais são de pequeno porte e de atendimento local, não possuindo infraestrutura de apoio para ampliação dos negócios na comunidade do Lagamar. O sistema de drenagem local é deficitário, tendo o rio como principal escape das águas pluviais.

A expansão urbana desordenada, a fragmentação urbana, a concentração de renda, o déficit habitacional e a falta de políticas públicas de regularização fundiária são fatores socioeconômicos, políticos e urbanísticos que levam a criação dos NUIs (Polucha e Neto, 2023; Lima et al., 2021; Mariano et al., 2020). Esses núcleos são territórios frequentemente localizados em áreas periféricas e de risco, como encostas, margens de rios ou terrenos sujeitos a alagamentos (Braga, 2016). No caso do Lagamar, a falta de infraestrutura adequada, como sistemas de drenagem e saneamento, aumenta o risco dessas áreas às inundações, como foi comprovado nos mapas que indicam áreas de suscetibilidade à inundação. Sem drenagem eficiente, as chuvas intensas causam acúmulo de água, resultando em enchentes que afetam diretamente a população residente. Além disso, a impermeabilização do canal fluvial do riacho São João do Tauape, associado ao intenso assoreamento, eleva o risco à inundação.

O mapa que demonstra as áreas de suscetibilidade à inundação na ZEIS Lagamar representa simulações usando um modelo do HEC-HMS e HEC-RAS. O modelo é validado com descrições da impermeabilidade da bacia hidrográfica e das zonas históricas de inundação. O resultado indica claramente a existência de unidades habitacionais em zonas de risco à inundação, o que indica a ineficácia das políticas de regularização fundiária adotadas na cidade de Fortaleza.

As quatro imagens das seções A-D produziram resultados hidráulicos semelhantes, havendo unidades habitacionais em risco em todos os trechos ao longo do canal do São João do Tauape. No estudo, o modelo HEC-HMS e HEC-RAS apresentou bom desempenho na simulação de eventos de picos de vazão para o trecho estudado, coincidindo com os relatos de moradores e com as observações de campo.

O modelo utilizado, considerando as características da área de estudo, se destaca por sua capacidade representativa das variáveis admitidas. Assim, o método determinístico de precipitação-vazão, inerente ao modelo, em que é calculado o pico da vazão de um escoamento superficial a partir da intensidade máxima da chuva e das características das bacias, atua com maior precisão em relação a modelos estocásticos como ARIMA (Montanari, Rosso e Taquq, 1997; Shumway e Stoffer, 2017; Katimon, Shahid e Mohsenipour, 2017), cuja especificidade se dá em estimar os valores a partir de características de elevado grau de incerteza em séries temporais estacionárias e não estacionárias (Moreira, 2005) e MARKOV (Akintug e Rasmussen 2005; Vrugt et al., 2008; Pender et al., 2016), em que a evolução do sistema em relação ao tempo é o principal elemento de análise.

Ademais, os métodos de modelos empíricos, como de curva de duração (vazão x tempo), equação de regressão e modelo distribuído (vazão uniforme distribuída na área da bacia e precipitação constante e determinada), entre outras variáveis discretas, foram adotadas de forma que estabelecessem uma base complementar, na qual a realidade material pudesse ser comparada, com as correções e calibrações realizadas em cada etapa do modelo, de forma a reduzir ao mínimo o desvio dos resultados em relação ao identificado na área de estudo. Isso resultou em dados que mostram aderência dos

valores de cota de inundação encontrados na modelagem com o observado no histórico de ocorrências na área de estudo.

Historicamente (Diário do Nordeste, 2011; G1 CE, 2019; O Povo, 2019), as ruas Clóvis Maia, Tenente Wilson, Jaime Andrade e Tenente João Albano são afetadas pelos eventos de inundação provenientes da bacia do Riacho do São João do Tauape, chegando a atingir cotas superiores à máxima secular (3,6m em relação ao fundo do canal). Isso demonstra a ineficiência do sistema público de esgotamento de efluentes que, majoritariamente, drena para o interior do canal do Riacho, comprometendo sua capacidade de fluxo pelo acúmulo de detritos em seus vertedouros e talvegue, intensificando ainda mais o processo de cheia.

No que pese se tratar de um modelo determinístico, de variáveis conhecidas e articuladas, cabe pontuar que o refinamento do modelo se daria a partir da discretização de outras variáveis que pudessem compor a metodologia juntamente com aquelas já adotadas. Dessa forma, outros fenômenos naturais ou socioculturais decorrentes da modificação do espaço urbano, atuantes nas características já mensuradas, podem atribuir novas dinâmicas aos resultados espacializados, bem como proporcionar a capacidade de comparativo entre um estudo elaborado em condições atuais e possíveis cenários futuros, em que as intensas mudanças climáticas ocorrentes estejam contempladas.

Gestão de riscos naturais em áreas urbanas do Brasil

Considerando o comportamento pluviométrico de Fortaleza, associado aos aspectos topográficos e a taxa de urbanização ($\approx 100\%$) da ZEIS do Lagamar, é possível entender o cenário quanto ao favorecimento dos eventos de inundação recorrentes no riacho São João do Tauape, que assolam os habitantes e as estruturas dessa porção do território municipal. Trata-se de uma área especialmente sensível do ponto de vista socioeconômico e ambiental (Fortaleza, 2020), destinada, prioritariamente, à promoção da regularização urbanística e fundiária de assentamentos habitacionais consolidado de baixa renda (Fortaleza, 2009).

O processo de urbanização desordenada sofrido no entorno do riacho São João do Tauape provocou alterações nos aspectos físico-ambientais, como, por exemplo, a potencialização do escoamento superficial e o comprometimento da infiltração das águas pluviais. Na ZEIS do Lagamar, a drenagem urbana vem se mostrando ineficiente para cumprir o papel de escoar as águas pluviais. Os setores Norte e Sul das margens do canal do Lagamar sofrem alagamentos e/ou inundações sazonais que se agravam em função da intensidade e da distribuição das chuvas ocorridas no ano, preferencialmente entre os meses de janeiro e abril. Vale ressaltar que boa parte da ZEIS está assentada em solos saturados de água, pois tratam-se de áreas baixas associadas à planície fluvio-marinha do rio Cocó.

A rede coletora de esgoto e a rede de drenagem urbana, geralmente, não conseguem funcionar, efetivamente, durante os períodos de chuva. Isso se deve a fatores ambientais (áreas baixas e saturadas de água), sociais (acúmulo de resíduos sólidos nas ruas e entupimento das redes) e de engenharia (redes mal dimensionadas). Os problemas gerados para os habitantes da ZEIS do Lagamar, durante os meses chuvosos, referem-se especialmente à limitação da mobilidade, perda de móveis e eletrodomésticos e proliferação de doenças por veiculação hídrica.

Salienta-se ainda que, por se tratar de uma área densamente ocupada, iniciada na década de 1950 (Coutinho, 2020), as áreas de inundação e/ou alagamento tendem a se multiplicarem devido ao processo de impermeabilização do solo. No ano de 2020, 1.324 famílias foram atingidas pelas chuvas na ZEIS do Lagamar (Fortaleza, 2020). Embora a área da ZEIS tenha passado por um processo de requalificação urbana entre os anos de 1987 e 1990, os alagamentos voltaram a partir do ano 2000. Em 2004, a ZEIS do Lagamar foi alagada por três vezes, sendo as piores até agora em termos de perdas materiais e humanas (Fortaleza, 2020). Para a área analisada, estima-se que, aproximadamente duas mil e trezentas pessoas sejam diretamente afetadas pelas inundações ao longo das ZEIS do Lagamar. Tal valor leva em consideração a média de pessoas por domicílio (2,79) estimado no último censo demográfico (IBGE, 2023). Este quantitativo representa 0,09% da população total de Fortaleza.

A ZEIS Lagamar não é um caso isolado. No Brasil, é possível observar diversos outros exemplos que relacionam fatores como chuva, escoamento superficial, áreas urbanas consolidadas, assentamentos

precários e desastres. Os casos mais recentes estão relacionados aos eventos que atingiram parte das cidades do Rio Grande do Sul (2024), litoral de São Paulo (2023) e região serrana do Rio de Janeiro (2011), que tratam-se de contextos morfoclimáticos e morfodinâmicos distintos do caso do Lagamar, mas que demonstram a relevância desse problema em amplitude nacional. Todos esses episódios são considerados tragédias climáticas, em que a modelagem computacional com cenários de risco e políticas públicas de regularização fundiária e prevenção poderiam ter atenuado as consequências dos eventos extremos de precipitação.

Tucci (1998) afirma que o uso de modelos hidrológicos se apresenta como importante ferramenta que permite a representação, entendimento e simulação do comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, por meio do equacionamento de seus processos. O modelo hidrológico abrange um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros que estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, para ajudar a entender o impacto das mudanças no uso da terra (Silva, 2007).

O entendimento do fluxo hídrico nos diversos compartimentos ambientais é essencial na gestão de recursos hídricos e no dimensionamento de obras hidráulicas (Almeida; Serra, 2017). No entanto, a quantificação desses diversos fluxos *in loco* é muito difícil devido à grande variabilidade de fatores ambientais e à extensão das áreas a serem estudadas. Diante disso, a modelagem hidrológica se apresenta como um instrumento fundamental nessas quantificações (Tucci, 2007).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem hidrológica utilizada neste trabalho possibilitou identificar as áreas atingidas pelas inundações ao longo da ZEIS do Lagamar para diferentes períodos de retorno dos eventos de precipitação máxima. Como observado, os resultados da modelagem ao longo do canal do São João do Tauape mostram que, ao longo de todas as seções analisadas, há unidades habitacionais que se encontram em áreas de risco de inundação.

Vale ressaltar que a bacia do Riacho São João do Tauape encontra-se completamente inserida no núcleo urbano da cidade de Fortaleza, apresentando elevado grau de impermeabilização do solo. Tais fatores favorecem que os eventos de deflúvio ocorram de maneira rápida, tendo sido estimado um pico de escoamento após 90 minutos do início das precipitações. Quando as inundações atingem o território da ZEIS, como é o caso estudado, os impactos socioeconômicos são devastadores e amplificados. As famílias que vivem nesses territórios enfrentam limitações econômicas significativas, e a perda de bens materiais, moradias, e até vidas, devido a enchentes e inundações, agrava ainda mais sua situação precária.

Desta forma, o mapeamento gerado a partir da modelagem hidrológica confere ao risco um caráter objetivo, que pode ser definido e estimado. Neste sentido, a modelagem hidrológica aplicada neste trabalho possibilitou identificar as diversas áreas ao longo da ZEIS Lagamar que são atingidas pelas inundações urbanas, garantindo uma informação espacial e graduada quanto ao nível das águas em diversas seções do riacho.

É importante salientar que a utilização adequada destes modelos hidrológicos requer a construção de um banco de dados minimamente consistente, com séries históricas pluviométricas de, no mínimo, 30 anos (Tucci, 2009). Tais fatores favorecem a geração de dados de maior qualidade e que mais se aproximam da realidade, como o produto cartográfico apresentado neste artigo.

Os resultados obtidos demonstraram o grande potencial da integração das ferramentas de geoprocessamento e modelagem hidrológica no auxílio ao planejamento territorial, bem como na tomada de decisão dos gestores municipais. No caso da área analisada, pode-se afirmar que atualmente os objetivos das ZEIS Lagamar não estão sendo atingidos, pois diversas habitações encontram-se em áreas de risco recorrente de inundação, não garantindo a qualidade ambiental aos seus habitantes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual do Ceará (ProPGeo/UECE) e Universidade Estadual do Ceará (UECE) pelo apoio logístico, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa produtividade dos autores Frederico de Holanda Bastos (310887/2021-6) e Davis Pereira de Paula (309102/2022-7) e aos revisores da Revista Caminhos de Geografia pelos comentários e sugestões que contribuíram para a versão final do manuscrito.

REFERÊNCIAS

- AKINTUG, B.; P. F. RASMUSSEN. A Markov switching model for annual hydrologic time series. **Water Resources Research**, v. 41, n. 9, 1-10, 2005. <https://doi.org/10.1029/2004WR003605>
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- ANTÔNIO, A. As Implicações Das Mudanças Climáticas Nas Zonas Urbanas De Moçambique. **Revista Ciências Humanas**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2023. <https://doi.org/10.32813/2179-1120.2023.v16.n1.a964>
- BARBOSA, S. E. da S.; BARBOSA JÚNIOR, A. R.; SILVA, G. Q.; CAMPOS, E. N. B.; RODRIGUES, V de C. Geração de modelos de regionalização de vazões máximas, médias de longo período e mínimas de sete dias para bacia do rio do Carmo, Minas Gerais. **Eng. Sanit. Ambiental**, vol. 10, n. 1, p. 64-71, 2005. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522005000100008>
- BASSO, R. E; ALLASIA, D. G; TASSI, R; PICKBRENNER, K. Revisão das Isozonas de chuvas intensas no Brasil. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.21, n. 4, p. 635-641, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016133691>
- BLAIKIE, P., CANNON, T., DAVIS, I., WISNER, B. **At risk: Natural hazards, people's vulnerability and disasters**. London: Routledge. 1994.
- BODOQUE, J. M., AROCA-JIMÉNEZ, E., EGUIBAR, M. Á., GARCÍA J. A. Developing reliable urban flood hazard mapping from LiDAR data. **J. Hydrol.**, v. 617, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128975>
- BRAGA, R. Indicadores de sustentabilidade para avaliação de zonas especiais de interesse social (ZEIS) para implantação de habitação social na cidade de Piracicaba-SP. **Caderno de Geografia**, v.26, n.46, p. 464-485, 2016. <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2016v26n46p464>
- CABRAL, S. L; CAMPOS, J. N. B; SILVEIRA, C. da S.; TEIXEIRA, F. A. de 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.
- CAJAZEIRO, J. M. D. **Análise da Susceptibilidade à formação de inundações nas bacias e áreas de contribuição do Ribeirão Arrudas e Córrego da Onça em termos de índices morfométricos e impermeabilização**. 101f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. "Geoprocessamento em Projetos Ambientais". Tutorial Apresentado no Congresso GIS Brasil. Disponível em: www.dpi.inpe.br/cursos/gisbrasil. 1998. Acessado em: 28 nov. 2023.
- CASTRO, M., PEIXOTO, M. N.O., PIRES DO RIO, G. A. Riscos ambientais e geografia: conceituações, abordagens e escalas. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, UFRJ, v.28, n.2, p. 11-30, 2005. https://doi.org/10.11137/2005_2_11-30
- CAVALCANTE, J. C.; VASCONCELOS, A. M.; MEDEIROS, M. F.; PAIVA, I. G. **Mapa Geológico do Estado do Ceará**. Escala: 1:500.000. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil, 2003.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo, SP. Edgard Blucher, 236p. 1999.
- CIRILO, J. A. Análise dos processos hidrológico-hidrodinâmicos na bacia do Rio São Francisco. Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- COELHO, A. L. N. Sig Aplicado em Inundações Urbanas: Estudo de caso no Município de Vitória – ES (Brasil), **Ciência Geográfica**, v. XX, p. 33 – 43, 2016.

- COUTINHO, C. M. **Lagamar: com o estado, apesar do estado, contra o estado pelo viés habitacional**. 43f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Curso de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- CUTTER, S. L. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, v. 20, n. 4, p. 529-539, 1996. <https://doi.org/10.1177/030913259602000407>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual De Pavimentação**. 3.ed. – Rio de Janeiro, 2006.
- DIÁRIO DO NORDESTE. REDAÇÃO. 2011. **Ruas inundadas no Lagamar**. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/metro/ruas-inundadas-no-lagamar-1.105498> Acessado em: 14 ago 2024.
- DIÁRIO DO NORDESTE. REDAÇÃO. 2024. **Fortaleza tem dia com maior chuva dos últimos 20 anos, com 215,1 milímetros acumulados**. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/fortaleza-tem-dia-com-maior-chuva-dos-ultimos-20-anos-1.3477367> Acessado em: 21 out 2024.
- EMERGENCY EVENTS DATABASE – EM-DAT. **International Disaster Database**, 2020. <https://public.emdat.be/> accessed on 12 de julho de 2020.
- ESTEVES, C. J. de O. Risco e Vulnerabilidade Socioambiental: Aspectos Conceituais. **Caderno IPARDES**. Curitiba, Paraná. v.1, n.2, p. 62-79, 2011.
- FERRAZ, F. F., FERRAZ, E. S., BALLESTER, M. V. R., MORAES, J., VICTORIA, R. L., MARTINELLI, L. A. Previsão de Áreas de Inundação a cidade de Piracicaba (SP) através de Sistema de Informações Geográficas (SIG). **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n.3, p. 17-27, 1998. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v3n3.p17-27>
- FORTALEZA. Instituto de Planejamento de Fortaleza. **Diagnóstico físico-ambiental e normatização especial de parcelamento, edificação, uso e ocupação do solo**. Fortaleza: IPLANFOR, 2020. 113 p.
- FORTALEZA. **Lei Complementar nº 062, de 02 de fevereiro de 2009**. Institui o Plano Diretor Participativo do Município de Fortaleza e dá outras providências. Fortaleza: Câmara Municipal de Fortaleza, 2009.
- FORTALEZA. Sistema de Monitoramento Diário de Agravos. **População segundo o sexo, Fortaleza, 2021-2022**. Fortaleza: SIMDA, 2024. Disponível em: <https://simda.sms.fortaleza.ce.gov.br/simda/populacao/sexo>. Acesso em: 07 de ago. 2024.
- FUNDAÇÃO Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. **Séries históricas das chuvas. 2023**. Disponível em: <http://www.funceme.br/index.php/areas/tempo/download-de-series-historicas>. Acesso em: 24 nov. 2023.
- G1 CEARÁ. 2019. **Canal do Lagamar transborda e invade casas e deixa moradores ilhados em Fortaleza**. Disponível em: <https://g1.globo.com/ce/ceara/noticia/2019/04/02> Acesso em: 14 ago. 2024.
- GOMES, M. M. A., VERÇOSA, L. F. M., CIRILO, J. A. Hydrologic models coupled with 2D hydrodynamic model for high-resolution urban flood simulation. **Natural Hazards**, v. 108, p. 3121–3157, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04817-3>
- GRASSI, J., DEPPE, F., LOHMANN, M., SANGOI, D. S. Mapeamento da Vulnerabilidade a inundações e deslizamentos de terra no Estado do Paraná. In: **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. Foz do Iguaçu, Paraná, 2013.
- HORTA, A. G., MOREIRA, M. G., LINO, L., DISCINI, A., & MARQUES, M. Definição do regime de chuva de uma região utilizando os métodos de Gumbel, equações de chuvas e otto pfafter. **Paramétrica**, v. 13, n. 14, p. 2–16, 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **AGÊNCIA IBGE NOTÍCIAS**. 2023. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37238-pais-tem-90-milhoes-de-domicilios-34-a-mais-que-em-2010>. Acesso em: 21 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE CIDADES**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>. Acesso em: 23 jul. 2024.

KATIMON, A., SHAHID, S., & MOHSENIPOUR, M. Modeling water quality and hydrological variables using ARIMA: a case study of Johor River, Malaysia. **Sustainable Water Resources Management**, v. 4, n. 3, p. 991-998, 2017. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0202-8>

KOTTOW, M. The vulnerable and the susceptible. **Bioethics**, New Jersey, nº 17, p. 460-71, 2003. <https://doi.org/10.1111/1467-8519.00361>

LEOTTI, V. B; COSTER, R; RIBOLDI, J. Normalidade de Variáveis: Métodos de verificação e comparação de alguns testes não paramétricos por simulação. **REVISTA HCPA**, v, 32, n, 2, p. 227-234. 2012.

LIMA NETO, Vicente de Sousa; BATISTA, Tatiane Lima; NUNES, Jonas Daniel; TAVARES, Paulo Roberto Lacerda. Estudo comparativo de equações intensidade-duração-frequência da cidade de Fortaleza - CE, Brasil. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, XXVIII., 18 a 21 sept. 2018, Buenos Aires-Argentina. **Anais[...]** Buenos Aires-Argentina, 2018.

LIMA, A. N. V.; GONZALEZ, F. C. S.; MACEDO JÚNIOR, G. S.; VIVEIROS, L. O Bairro de Tororó em disputa: regime jurídico das Zonas Especiais de Interesse Social e tentativas de remoções em Salvador. **Revista Brasileira de Direito Urbanístico | RBDU**, v. 7, n. 12, p. 233–249, 2021. <https://doi.org/10.55663/rbdu.v7i12.335>

LIMA, L. M. M. de. **Mapeamento de Suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre-RS**. 174f. Dissertação de Mestrado – (Instituto de Geociências) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

MACEDO, Y. M., ALMEIDA, L. Q. de., TROLEIS, A. L., MACIEL, A. B. C. Vulnerabilidade Socioambiental em escala de detalhe: O caso da Mãe Luiza, Natal, RN – Brasil. **Revista Geosaberes**, Fortaleza, v.6, n. 2, p.145-157, 2015.

MARANDOLA Jr., E.; HOGAN, D. J. Natural Hazards: O estudo geográfico dos riscos e perigos. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 95-109, jul. /dez. 2004. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2004000200006>

MARIANO, C. M., CARVALHO, H. S., BARBOSA, G. B. A sabotagem das zonas especiais de interesse social de vazio pelo município de Fortaleza: um indicativo do abandono das ZEIS como instrumento de política urbana e de regularização fundiária na cidade?. **InSURgência: revista de direitos e movimentos sociais**, v. 6, n. 2, p. 1-27, 2020. <https://doi.org/10.26512/insurgencia.v6i2.32078>

MARQUES, J. M. R.; LIMA, J. S. Q.; SANTOS, J. O. Fragilidade ambiental, vulnerabilidade social e riscos de desastres no baixo curso do rio Maranguapinho, Fortaleza-Ceará-Brasil. **Territorium**, n. 27, p. 25-35, 2020. https://doi.org/10.14195/1647-7723_27-1_3

MEDEIROS, C. N. de. **Vulnerabilidade socioambiental do município de Caucaia (CE): Subsídios ao ordenamento territorial**. 267f. Tese de Doutorado Em Geografia, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2014.

MONTANARI, A., ROSSO, R., & TAQQU, M. S. Fractionally differenced ARIMA models applied to hydrologic time series: Identification, estimation, and simulation. **Water Resources Research**, v. 33, n. 5, p. 1035–1044, 1997. <https://doi.org/10.1029/97WR00043>

MONTEIRO, J. B. **Desastres naturais no Estado do Ceará: uma análise de episódios pluviométricos extremos**. 255f. Tese (Doutorado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**, v. 10, n. 2, p.13-25, 2013. <https://doi.org/10.21168/rega.v10n2.p13-25>

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviométricos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambientais – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NISSEN, K. M.; ULBRICH, U.: Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, v. 17, n. 7, p. 1177–1190, 2017. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1177-2017>

NUNES, F. G.; FIORI, A. P. A utilização do método de Ven Te Chow - Soil Conservation Service (SCS) na estimativa da vazão máxima da bacia hidrográfica do rio Atuba. **Geografar**, v. 2, n. 2, p. 139-155, 2007. <https://doi.org/10.5380/geografar.v2i2.12104>

O POVO. 2019. **Moradores do Lagamar perdem bens, temem problemas de saúde e reclamam de ruas alagadas**. Disponível em: <https://www.opovo.com.br/noticias/fortaleza/2019/04/02/moradores-do-lagamar-perdem-bens--temem-problemas-de-saude-e-reclamam-de-ruas-alagadas.html> Acesso em: 14 ago. 2024

PAINTER, J.; ETTINGER, J.; DOUTREIX, M. N.; STRAUSS, N.; WONNEBERGER, A.; WALTON, P. Is it climate change? Coverage by online news sites of the 2019 European summer heatwaves in France, Germany, the Netherlands, and the UK. **Climatic Change**, v. 169, n. 4, p. 1-28. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03222-w>

PEITER, C. M. **Desastres Naturais**: Enchentes e Inundações e o papel do Estado e da Sociedade na gestão de Segurança Pública. Dissertação de Mestrado em Ciência Jurídica. Universidade do Vale do Itajaí. Itajaí, Santa Catarina. 2012.

PENDER, D., PATIDAR, S., PENDER, G., HAYNES, H. **Stochastic simulation of daily streamflow sequences using a hidden Markov model**. Hydrology Research. Ed. 47.1. 2016. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.114>

PEQUENO, L. R. B. **Políticas habitacionais, favelização e desigualdades sócio-espaciais nas cidades brasileiras**: transformações e tendências. Scripta Nova (Barcelona), v. XII, p. 35, 2008.

PEREIRA, G. M.; SOUSA JUNIOR, A. M.; VIEIRA, A. H. Marco Legal da Urbanização no Brasil: reflexos na função social da propriedade. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, v. 11, n. 1, p. 77-94. <https://doi.org/10.3895/rbpd.v11n1.14541>

PHOURATSAMAY, S-LEU., SCAPARRA, M. P., TRAN, T. H., LAPORTE, G. Strategic flood impact mitigation in developing countries' urban road networks: Application to Hanoi. **European Journal of Operational Research**, v. 319, n. 3, p. 862-876, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2024.06.035>

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. C. **Mapa geológico do Estado do Ceará**. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará. Escala de 1:500.000. Fortaleza: Serviço Geológico do Brasil/CPRM, 2021.

POLUCHA, R.; NETO, P. N. Zonas Especiais de Interesse Social e idiosincrasias locais: o caso de Curitiba/PR. **Revista Brasileira de Direito Urbanístico | RBDU**, Belo Horizonte: Fórum, v. 9, n. 16, p. 387-413, 2023. <https://doi.org/10.55663/RBDU.v09.i16-ART15>

REGO, S. C. A., MELO, H. D. A. C de., MACEDO, M. L. A., PONTES FERNANDES, L. G DE., BEZERRA, D. da S. **Utilização do Sistema de Informações Geográficas (SIG) na identificação de possíveis áreas sob o risco de inundação**. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências e Tecnologia da Geoinformação. Recife, Pernambuco, 2012.

SANTOS, J. de O. Relações entre Fragilidade Ambiental e Vulnerabilidade Social na Susceptibilidade aos Riscos. **MERCATOR**, v. 14, n. 2, p. 75-90, 2015. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1402.0005>.

SANTOS, K. R. dos. Inundações Urbanas: um passeio pela literatura. **Revista de Geografia da Universidade Estadual de Goiás**. Goiânia, v.1, n:1, p. 177-190, 2012.

SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. 5ª ed. São Paulo: Edusp, 2008. 176p.

SHUMWAY, R.H., STOFFER, D.S. **ARIMA Models**. In: Time Series Analysis and Its Applications. Springer Texts in Statistics. Springer, Cham. p. 75-163. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52452-8_3.

SILVA, L. P. E. **Modelagem e geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do rio Cuiá - João Pessoa**. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.

SILVINO, A. N. O; SILVEIRA, A; MUSIS, C. R; WYREPKOWSKI, C. C; CONCEIÇÃO, F. T. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. **GEOCIÊNCIAS**, v. 26, n. 4, p. 369-378, 2007.

- SMITH, K. **Environmental hazards**: Assessing risk and reducing disaster. London: Routledge, 3rd ed., 392p., 2001.
- SOUZA, M. J. N; NETO, J. M; SANTOS, J. O; GONDIM, M. S. **Diagnóstico Geoambiental do Município de Fortaleza**: subsídios ao macrozoneamento ambiental e à revisão do Plano Diretor Participativo – PDPFor. Fortaleza: Prefeitura de Fortaleza, 2009. 172 p.
- SOUZA, M. L. **Mudar a cidade**: uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanas. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 558 p.
- TABORGA TORRICO, J.J. **Isozonas, in Práticas hidrológicas**. Rio de Janeiro, RJ, pp. 9-18. 1974.
- TIBURCIO, E. C; CASTRO, M. A. H. **Uso de Sistema de Informações Geográficas para Determinação de Vazões Máximas em Projetos de Hidrologia**. XVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2002.
- TOMINAGA, L. K., SANTORO, J., AMARAL, R. do. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. Instituto Geológico. São Paulo, 2009.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1998. 669 p.
- TUCCI, C.E.M. (2000). **Hidrologia – Ciência e Aplicação**. Coleção ABHR de Recursos Hídricos. Porto Alegre, RS. 1993. 944p.
- TUCCI, C.E.M. **Inundações urbanas**. Porto Alegre: ABRH/RHAMA, 2007. 389 p.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos distribuídos**. Rhama, Porto Alegre, RS. 2010.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Matemáticos em Hidrologia e Hidráulica**. Revista Brasileira de Engenharia – RBE. Rio de Janeiro, RJ. 1987. 600p.
- UMBELINO, G. J. M. **Proposta metodológica para a avaliação da população residente em áreas de risco ambiental**: o caso da bacia hidrográfica do Rio da Onça/MG. 126f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS – 3.5 - Technical Reference Manual**. Hydrologic Engineering Center, Davis-CA, 2010.
- VEDOVELLO, R., MACEDO, E. S. de. **Deslizamentos de encostas**. In: Santos, Rosely Ferreira dos. (org.). Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos? Brasília, Ministério do Meio Ambiente – MMA, pp. 75-94. 2007.
- VEYRET, Y. **Os Riscos**: O Homem como agressor e vítima do meio ambiente. Ed. Contexto, 320 p., 2007.
- VRUGT, J. A., Ter BRAAK, C. J. F., CLARK, M. P., HYMAN, J. M., & ROBINSON, B. A. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. **Water Resources Research**, v. 44, n. 12, p. 1-15, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007WR006720>
- ZHOU, Q.; SU, J., ARNBJERG-NIELSEN, K., REN, Y., LUO, J., YE, Z., FENG, J. A GIS-Based Hydrological Modeling Approach for Rapid Urban Flood Hazard Assessment. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1483, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13111483>

Recebido em: 16/09/2024

Aceito para publicação em: 14/11/2024