

# SUSCETIBILIDADE E EXPOSIÇÃO ÀS INUNDAÇÕES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO DO SILVA, MACEIÓ-ALAGOAS, BRASIL

Walber Gama<sup>1</sup>  
José Vicente Ferreira Neto<sup>2</sup>  
Maria Elisa Zanella<sup>3</sup>

## RESUMO

O aumento das inundações em intensidade e frequência e as alterações do clima podem ser potencializadores do aumento de danos materiais e perdas de vidas. Além disso, populações habitam planícies fluviais e alteram os leitos de inundações o que acaba por gerar maiores impactos. Assim, esse estudo visa identificar as áreas potenciais e os níveis de suscetibilidade às inundações com aplicação de um modelo conceitual na bacia hidrográfica do riacho do Silva, por um processo interativo de análise multicritério (AMC) num Sistema de Informação Geográfica (SIG). O modelo indicou aumento da exposição das edificações às inundações ao longo do período analisado, mostrando-se como uma importante ferramenta para gestão e subsídio às medidas de mitigação dos riscos de inundações na bacia hidrográfica do riacho do Silva, sendo base para um sistema de alerta.

**Palavras-chave:** Inundações. Níveis de suscetibilidade. Sistema de alerta. Análise Multicritério.

## SUSCEPTIBILITY AND EXPOSURE FROM RIVER FLOODS IN THE RIACHO DO SILVA WATERSHED, MACEIÓ-ALAGOAS, BRAZIL

### ABSTRACT

The increase in floods in intensity and frequency and climate change can be potentiators of increased property damage and loss of life. In addition, populations inhabit river plains and alter flood beds, which ends up generating greater impacts. Thus, this study aims to identify the potential areas and the levels of susceptibility to flooding with the application of a conceptual model in the basin of the Riacho do Silva stream, by an interactive process of multicriteria analysis (MCA) in a Geographic Information System (GIS). The model indicated an increase in the exposure of buildings to flood over the period analyzed, showing itself as an important tool for management and support of flood risk mitigation measures in the Riacho do Silva watershed, being the basis for an alert system.

**Key-words:** Flood. susceptibility levels. warning system. Multi-Criteria Analysis.

---

<sup>1</sup>Instituto Federal de Alagoas, Campus Marechal Deodoro, Doutor em Geografia Física. E-mail: walber.mgama@gmail.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Alagoas, Doutor em Geociências. E-mail: jvferreiraneto@igdema.ufal.br

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará, Doutora em Meio Ambiente e Desenvolvimento. E-mail: elisazv@terra.com.br

## SUSCEPTIBILITÉ ET EXPOSITION AUX INONDATIONS FLUVIALES DANS LE BASSIN VERSANT DE RIACHO DO SILVA, MACEIÓ- ALAGOAS, BRÉSIL

### RÉSUMÉ

L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des inondations et le changement climatique peuvent être des potentialisateurs de l'augmentation des dommages matériels et des pertes de vie. De plus, les populations habitent les plaines fluviales et modifient les lits d'inondation, ce qui finit par générer des impacts plus importants. Ainsi, cette étude vise à identifier les zones potentielles et les niveaux de susceptibilité aux inondations avec l'application d'un modèle conceptuel dans le bassin du ruisseau Silva, par un processus interactif d'analyse multicritère (ACM) dans un Système d'Information Géographique (SIG). Le modèle a indiqué une augmentation de l'exposition des bâtiments aux inondation au cours de la période analysée, se révélant être un outil important pour la gestion et le soutien des mesures d'atténuation des risques d'inondation dans le bassin versant du ruisseau Silva, étant la base d'un système d'alerte.

**MOTS CLÉS:** Inondation. Niveaux de susceptibilité. Système d'alerte. Analyse MultiCritères.

### INTRODUÇÃO

A exposição corresponde a situação das pessoas, infraestrutura, habitação, capacidades de produção e outros ativos humanos tangíveis localizados em áreas propensas a qualquer fenômeno perigoso: deslizamentos, erosão costeira, inundações, etc. (UNISDR, 2017). Aproximadamente 23% da população mundial (1,81 bilhão de pessoas) está diretamente exposta às inundações com nível de água acima de 0,15 metros em eventos de inundação que ocorrem 1 vez em 100 anos, representando assim um risco significativo para vidas e meios de subsistência (RENTSCHLER et al., 2022).

As inundações têm aumentado globalmente em frequência e em duração entre os anos 1985 e 2015, sendo 2005 o ano com mais ocorrências no mundo (NAJIBI e DEVINENI, 2018). Segundo relatório do UNISD/CRED (2015), as inundações representaram 47% de todas as catástrofes relacionadas com o clima no período 1995 a 2015. As perdas globais médias anuais devido às inundações totalizaram quase US\$ 20 bilhões. Quanto à sua ocorrência no Brasil, a média de eventos de enxurradas aumentou de 227/ano entre 1991 e 2001, para 504/ano no período de 2002 a 2012. Em Alagoas, os anos de 2000, 2004, 2009 e 2010 foram os anos com maiores inundações (UFSC, 2013).

Inundação é o transbordamento de um canal fluvial normalmente em terras secas em planície de inundação (inundações ribeirinhas), níveis acima do normal ao longo da costa

(inundações costeiras) e em lagos ou reservatórios (IRDR, 2014). As inundações urbanas, na maioria das vezes, estão associadas às alterações do uso e ocupação do solo com áreas impermeabilizadas, que potencializam o escoamento superficial, sendo expectável a intensificação com as mudanças climáticas (KUNDZEWICZ, 2004; KUNDZEWICZ et al., 2013; OVEREEM et al., 2013). Como efeito da ocupação do território e de alterações ambientais nos leitos dos rios, com a retirada das matas ciliares e deposição de sedimentos, a morfologia dos canais fluviais se altera (SMITH et al., 2019). O confinamento dos canais de drenagens fluviais por diques, por outro lado, é muito mais estreito do que os territórios que os rios ocuparam no passado (SHEN, 2016).

Nesse sentido, torna-se importante identificar as áreas potenciais de ocorrências de inundações, sobretudo, com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Assim, torna-se possível realizar a delimitação de planície de inundação que é fundamental na determinação dos processos geomorfológicos e hidrológicos (CLUBB et al., 2017) das áreas propensas a inundações pela identificação dessa classe de relevo. São nessas áreas que devem ser definidos os níveis potenciais de inundações.

A suscetibilidade identifica o grau que determinada área pode ser afetada por uma futura inundação e delimita onde irá ocorrer (SANTANGELO et al., 2011). A suscetibilidade compreende as áreas propensas a ocorrência de fenômenos perigosos. As inundações se enquadram no grupo de fenômenos perigosos de origem hidrometeorológica tal como os deslizamentos, secas, onda de calor e maré de tempestade costeira (*coastal storm surge*) (UNISDR, 2009). Nesse contexto, a identificação das áreas de predisposição à inundação prepara de maneira rápida e efetiva a resposta em circunstâncias de inundações, principalmente devido ao crescimento populacional e de atividades econômicas em leito de inundações (DIAKAKIS et al., 2016; FACCINI et al., 2018; TELLMAN et al., 2021).

Com as identificações das áreas potenciais de ocorrência de inundação, pela suscetibilidade, é possível definir as infraestruturas expostas a este fenômeno. Assim, no caso da exposição às inundações, define-se a extensão das áreas inundáveis e contabiliza, dentro dessas áreas, o total de edificações expostas à inundação (BHUYAN et al., 2022). Com o uso de SIG se determinam os níveis de exposição das infraestruturas pela sobreposição com os níveis de suscetibilidade às inundações, definidos a partir da elaboração de modelos geográficos.

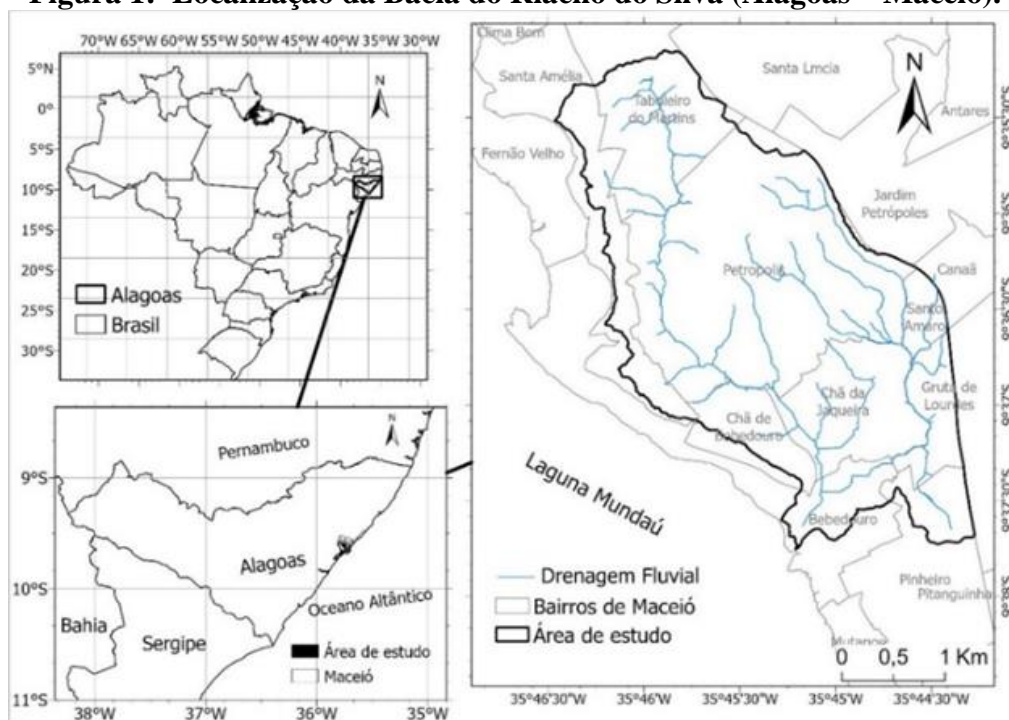
No que se refere aos modelos de suscetibilidade à inundação, têm sido elaborados por diferentes métodos: método *Analytical Hierarchy Process* (AHP); análise multicritério (AMC) (TIRYAKI e KARACA, 2018; MSABI e MAKONYO, 2020; GOUMRASA et al., 2021); método estatístico FR baseado na taxa de frequência das inundações associado aos fatores de predisposição (TEHRANY et al., 2014; SAMANTA et al., 2018; SUPPAWIMUT et al., 2021); e a integração dos fatores de predisposição por *machine learning model* (SHAFIZADEH-MOGHADAM et al., 2018; EL-HADDAD et al., 2021).

Giovannettone et al. (2018) afirmam que os modelos conceituais de suscetibilidade à inundação se assemelham aos modelos de base física na medida em que tentam descrever todos os processos pelos componentes hidrológicos, embora de uma maneira mais simplificada e menos física do processo. Diferem dos modelos hidráulicos, pois o nível de informação fornecido é muitas vezes qualitativo (DOTTORI et al., 2016). Observa-se, nesses modelos, que as variáveis utilizadas nem sempre são acumuladas e representativas do escoamento concentrado seguindo o gradiente topográfico da rede de drenagem fluvial. Para tanto, nesse estudo se aplica o modelo de suscetibilidade às inundações (REIS, 2011) na bacia hidrográfica do riacho do Silva (Figura 1) que utiliza variáveis acumuladas representativas do escoamento concentrado de montante a jusante ao longo dos canais fluviais e de áreas adjacentes. Dessa forma, esse estudo tem como objetivo identificar as áreas suscetíveis à inundação e apontar os níveis de exposição das habitações às inundações na bacia hidrográfica do riacho do Silva localizada em Maceió, Alagoas, com histórico de inundações ocorridas em 1989, 2000, 2001, 2010, 2017 e abril de 2021.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica urbana do riacho do Silva está situada na zona oeste do município de Maceió, totalizando 10,2 km<sup>2</sup> de área de drenagem, cujo comprimento do curso d'água maior é de 6,25 km. A bacia possui declividade média de 8,5° e máxima de 84,2° (Figura 1). A altitude média da bacia é de 51,2 m, tendo máxima de 95,0 m nas nascentes e mínima de 1,0 m na região de sua foz, na laguna Mundaú (Figura 1). Quanto às formas de relevo, predominam os tabuleiros costeiros nas cotas altimétricas acima de 70 m; as vertentes erosivas; os setores de rampa de colúvio/alúvio; e, em menores cotas, as planícies aluvionares (fluviais) e fluvio-lagunar, esta última na região da foz, na laguna Mundaú (GAMA e FALCÃO, 2023).

**Figura 1: Localização da Bacia do Riacho do Silva (Alagoas – Maceió).**



Corresponde a um ambiente sedimentar constituído de sedimentos areno-argilosos nos tabuleiros costeiros, onde ocorrem latossolos nos topos mais planos e argissolos nas vertentes que compõem os vales, além de sedimentos mais recentes, do quaternário, de origem fluvial e flúvio-lagunar, onde ocorrem neossolos flúvicos e sedimentos flúvio-marinhos nos setores planos em solos de mangue encharcado e gleissolos (PARAHYBA et al., 2008).

O clima é do tipo As' de Köppen com chuvas de outono e inverno concentradas nos meses de março a agosto (BARROS et al., 2012). O litoral e a zona da mata correspondem a uma região úmida, sendo que o volume de precipitação das normais climatológicas (1961-1990) é de 2.070,5 mm, mais elevado nos meses de abril a julho enquanto no período de 1981 a 2010 a normal é de 1.867,4 mm, com máximos entre os meses de maio a agosto. No período mais atual, 1991 a 2020, os maiores acumulados de precipitação ocorrem de maio a julho, sendo o máximo no mês de julho, com precipitação normal nesse período totalizando 1.808,1 mm, a menor em relação às normais climatológicas anteriores (INMET, 2009; 2018; 2022). Quanto à cobertura vegetal, apresenta floresta ombrófila nas unidades de conservação do Parque Municipal de Maceió e a Floresta Nacional (Flona), além de “campos” e “campo húmido”.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Inventário de marcas de inundações

Buscou-se elaborar o inventário georreferenciado do histórico de ocorrências de inundações pela identificação, em campo, das suas marcas nas casas, passeios, ruas, etc. Com o uso de um tablet e de um aplicativo coletor de dados Avenza Maps em campo, foram georreferenciados os pontos de marcas de extensão/alcance de inundações e por relatos dos moradores das áreas ribeirinhas que destacaram os eventos de inundações ocorridas em junho de 2010 e abril de 2021 como os mais representativos (Figura 2).

**Figura 2: Inundações A) e B) na Grota da Santa Helena em abril de 2021 nos dias 14 e 15 com o total de 132,0 mm de chuva; C) região da foz do riacho do Silva em maio de 2017 após acumulado de 230,4 mm.**

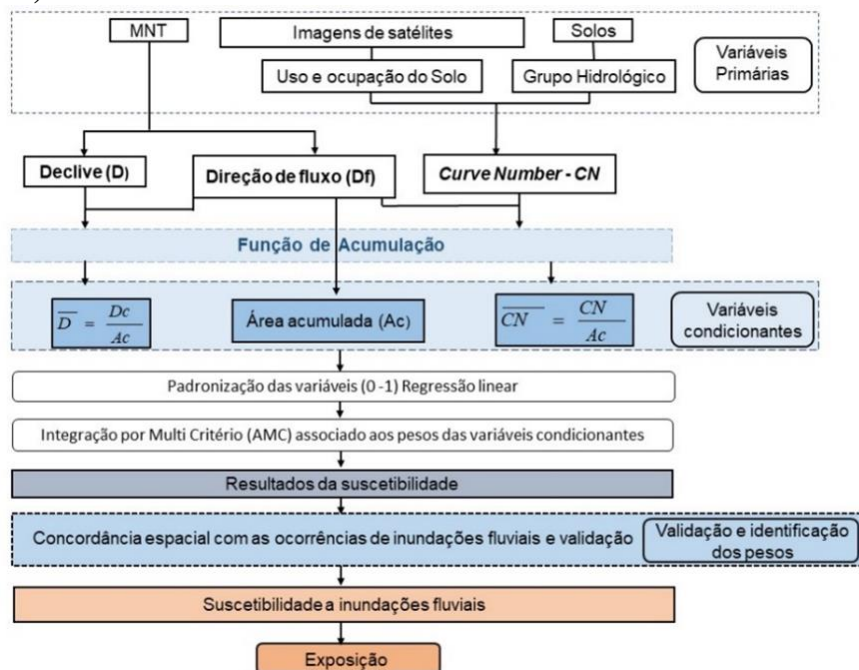


Também foram identificados pontos de inundação por meio de imagens de satélite de alta resolução (1m) da plataforma *GoogleEarthPro* datadas de maio/2017 e maio/2018, imagens estas utilizadas por serem livres de cobertura de nuvens e que registram as áreas inundáveis nos dois períodos supracitados; também foram utilizados registros fotográficos (Figura 2). Todos esses dados foram armazenados em sistema de informação geográfica e utilizados no ajuste geométrico das áreas inundáveis e validação do modelo conceitual de suscetibilidade às inundações, conforme preceituam Lastra et al. (2008); Kappes et al. (2012) e De Risi et al. (2017).

### Elaboração do modelo de suscetibilidade a inundações

As variáveis do modelo de suscetibilidade foram derivadas das curvas de nível em formato vetorial em escala 1/2000 com equidistância de 1 m gerando a rede irregular triangulada (TIN - *Triangulated Irregular Network*) que deu origem ao modelo numérico do terreno (MNT) permitindo assim obter as variáveis: declividade e área de bacia hidrográfica acumulada. O potencial de geração do escoamento superficial *Curve Number* (CN) foi obtido pela classificação dos solos (PARAHYBA et al., 2008) em grupos hidrológicos e integrado com o uso e ocupação do solo (GAMA e FALCÃO, 2023) (Figura 3).

**Figura 3. Fluxograma do modelo conceitual de suscetibilidade às inundações (adaptado de Gama, 2021).**



O modelo conceitual de suscetibilidade tem sido aplicado com sucesso em bacias hidrográficas, citando-se, entre outros, os trabalhos de Jacinto et al. (2015) e Santos e Reis (2017). O modelo conceitual identifica os setores da rede hidrográfica e áreas adjacentes susceptíveis às ocorrências de inundações por um processo representativo do escoamento superficial concentrado acumulativo nos cursos d'água, onde a suscetibilidade é classificada de acordo com a intensidade de acumulação resultante da interação das variáveis médias acumuladas (fatores de predisposição) integradas por análise multicritério (AMC), a partir das

variáveis primárias: declividade; *CN* – *Curve Number*; Área de Fluxo Acumulada, que, em seguida, são processadas e calculadas as variáveis médias de acumulação.

Os seguintes parâmetros foram calculados e avaliados: a) Área de fluxo acumulado (*Ac*): obtida pelo fluxo acumulado de cada célula no sentido da maior para menor altitude e pela direção de fluxo das oito células vizinhas (JENSON e DOMINGUE, 1988), a partir do modelo Numérico do Terreno (MNT) com células de 2 m × 2 m. Tal como o fluxo acumulado, foram obtidos o Declive e *CN* acumulado com base em TARBOTON (1997).

b) Declive médio ( $\bar{D}$ ): razão entre o declive acumulado (*Dc*) e a área de fluxo acumulado (*Ac*):

$$\bar{D} = \frac{Dc}{Ac} \quad (1)$$

c) *CN* acumulado médio: a variável de acumulação do *CN* foi construída com base no mapa de solos (PARAHYBA et al., 2008) que foi classificado em grupos hidrológicos de acordo com Sartori et al. (2005) e feito o cruzamento com o uso do solo. Posteriormente, foram fornecidos os valores de *CN* de acordo Cronshey et al (1986) que considera a condição média e normais do valor de *CN* de umidade dos solos que precedem a ocorrência de inundação. Assim, foi calculado o *CN* médio ( $\bar{CN}$ ) como a razão entre o *CN* acumulado (*CNAc*) e a área de fluxo acumulado (*Ac*):

$$\bar{CN} = \frac{CNAc}{Ac} \quad (2)$$

Calculadas as variáveis médias, foram identificadas as funções por regressão linear (Tabela 1) para padronização em valores de 0 a 1 e, em seguida, as ponderações e integração pela multiplicação dos pesos associados a cada uma das variáveis pelo processo iterativo de análise multicritério (AMC) num Sistema de Informação Geográfica (SIG).

**Tabela1: Variáveis médias utilizadas e resultado da regressão linear.**

Variáveis médias	Função regressão linear
Área de fluxo acumulado ( <i>Ac</i> )	$y = 1 x 10^{-5}x - 1*10^{-7}$
Declive médio	$y = 0,135x - 0,1351$
<i>CN</i> médio	$y = 0,135x - 0,1351$

Quanto à definição dos pesos, assume-se, a priori, que deve ser atribuído o maior peso à Área de fluxo acumulado (*Ac*), começando com valores em torno de 60%, e aos outros dois fatores (Declive médio e *CN* médio) devem ser atribuídos pesos menores e aproximadamente iguais, em torno dos 20% (SANTOS e REIS, 2017).



Vale ressaltar que a área de fluxo acumulado no modelo representa o escoamento superficial concentrado, por isso tem maior peso no processo de ponderação. Os resultados do modelo de suscetibilidade foram confrontados com o inventário georreferenciado de marcas de inundações para validação do modelo conceitual, definições dos níveis de suscetibilidade e das áreas adjacentes de alcance das inundações. Tal processo iterativo de integração das variáveis médias é calculado pela seguinte expressão:

$$SusctIn = \sum P_i N_i = P_{AC} \times Ac + P_D \times \underline{D} + P_{CN} \times \underline{CN} \quad (3)$$

Onde: *SusctIn* = suscetibilidade à inundação;  $P_{AC}$ ,  $P_D$ ,  $P_{CN}$ , são os pesos fornecidos a cada variável; *Ac*: área de fluxo acumulada;  $\underline{D}$ : declive médio; *CN*: *Curve Number* médio.

De acordo com Santangelo et al. (2020), o nível de exposição de áreas urbanas (ou de áreas aptas ao crescimento urbano) são os mesmos dos níveis de suscetibilidade. Para tanto, foram identificadas as edificações expostas às inundações no ano 2000 pela base cartográfica digital da prefeitura de Maceió e no ano 2021 com base em imagens de satélites de alta resolução (1 m) em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Assim, permitiu contabilizar o total de edificações (*Tedf*) e a área em hectares (*Area*) para contabilizar a evolução da exposição à inundação nesse intervalo de tempo de 21 anos através da densidade das edificações (*Dens*) (edificações por hectares) pela equação:

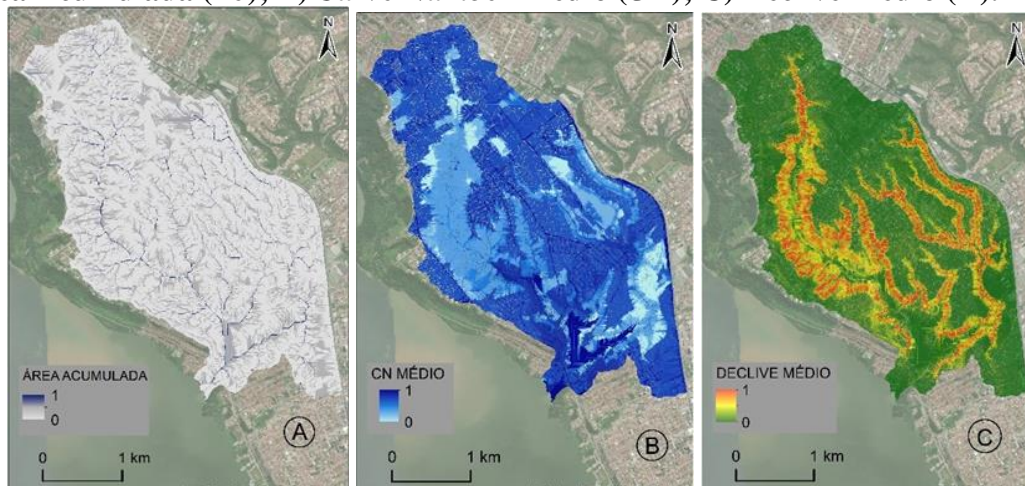
$$Dens = \frac{Tedf}{Area} \quad (4)$$

## RESULTADOS

### Modelo de inundações

De forma geral, o resultado da preparação das variáveis (Figura 4) para o processo iterativo (AMC) pelas funções da reta por regressão linear em 0 e 1, apresentou os seguintes resultados: para a Área de fluxo acumulado, o máximo de 1 nos setores de acumulação em fundos de vales e planícies fluviais e mínimo (0) nos setores mais planos da bacia hidrográfica, nos tabuleiros costeiros; para o  $\overline{CN}$  mostrou valores máximos (1) na região de solos encharcados de mangue/gleissolos e os mínimos em áreas de florestas ombrófilas; para o Declive médio  $\overline{D}$  os valores máximos (1) correspondem às vertentes erosivas e 0 se refere às áreas planas nos tabuleiros costeiros, planícies aluvionares e flúvio-estuarina (Tabela 1 e Figura 4).

**Figura 4: Variáveis utilizadas na elaboração do modelo de suscetibilidade à inundações: A) Área Acumulada ( $A_c$ ); B) *Curve Number* Médio ( $\overline{CN}$ ); C) Declive Médio ( $\overline{D}$ ).**



Em seguida, o resultado do teste de interação apresentou o maior peso de 0,85 para a variável Área de fluxo acumulado, o declive médio 0,10 e *Curve Number* médio 0,05. A partir desse resultado, os níveis de suscetibilidade nos canais de drenagens fluviais foram classificados em cinco níveis por desvio padrão, considerando a concordância espacial com as marcas de inundações inventariadas.

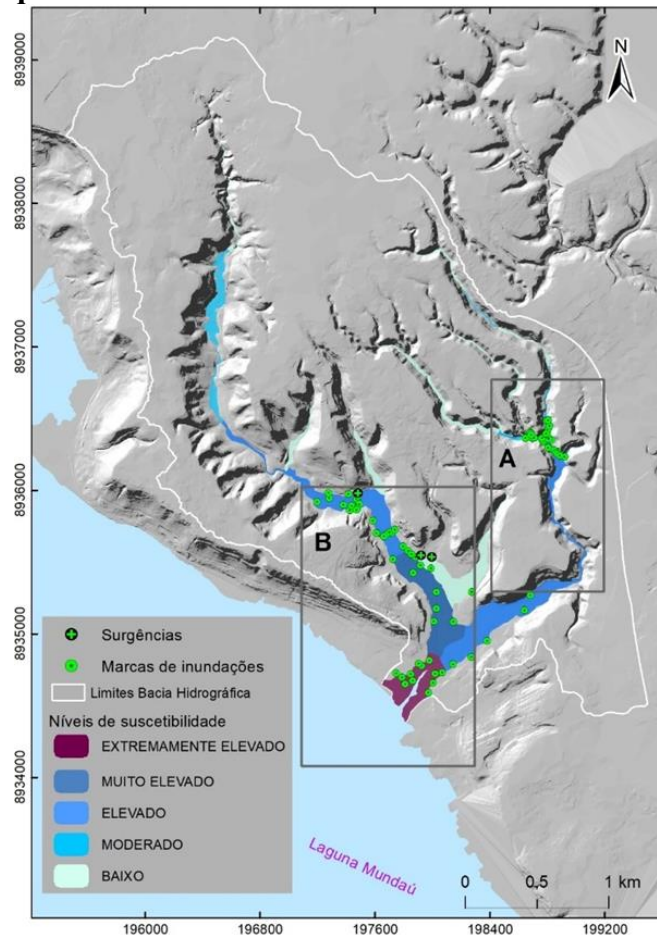
Nesse processo interativo (AMC) entre as variáveis, o aumento da ponderação do fluxo acumulado foi condição que possibilitou melhorar a acumulação nos fundos de vales e trechos de drenagem fluviais definindo a amplitude das classes em 5 intervalos de suscetibilidade: baixo (1), moderado (2), elevado (3), muito elevado (4) e extremamente elevado (5).

O modelo conceitual apresenta moderada a elevada suscetibilidade num setor de montante em vale encaixado e com forte declive na grota da Santa Helena (quadrante “A” na Figura 5) num setor que concentra toda a acumulação do escoamento superficial proveniente dos três canais fluviais de montante para jusante num único canal fluvial e, decorrente disto, faz elevar o nível de suscetibilidade para moderado e, em maior extensão e área, ao nível elevado. A suscetibilidade moderada e elevada coincide com significativas marcas de inundações em fundo de vale mais estreitos (quadrante “A” da Figura 5).

O modelo mostra que na Grota Santa Helena, devido à forte acumulação do escoamento, aos elevados valores médios de CN e aos declives acentuados ( $> 45^\circ$ ), há maior acumulação do escoamento superficial com predomínio do nível de suscetibilidade elevado que resultam no

maior potencial de inundação nesse setor e até próximo à foz da bacia hidrográfica do riacho do Silva (Figura 5).

**Figura 5: Modelo conceitual de suscetibilidade às inundações na bacia hidrográfica do riacho do Silva, nos quadrantes “A” Grota da Santa Helena e “B” Marquês de Abrantes.**



No vale direito, mais aberto e longo, a suscetibilidade é moderada e se torna elevada em um trecho de planície fluvial mais desenvolvida com concentração de marcas de inundações e afloramentos de águas “surgências” (quadrante “B” na Figura 5). O modelo mostra que este setor apresenta forte acumulação do escoamento superficial proveniente dos fortes declives das vertentes, que favorecem acumulação nos fundos de vales em nível moderado de suscetibilidade.

Com efeito dessa acumulação para jusante, em planície aluvionares com solos saturados, a acumulação do escoamento superficial é mais forte e, dessa maneira, o nível de suscetibilidade à inundação se torna elevado. Tal acúmulo do escoamento superficial com a contribuição dos

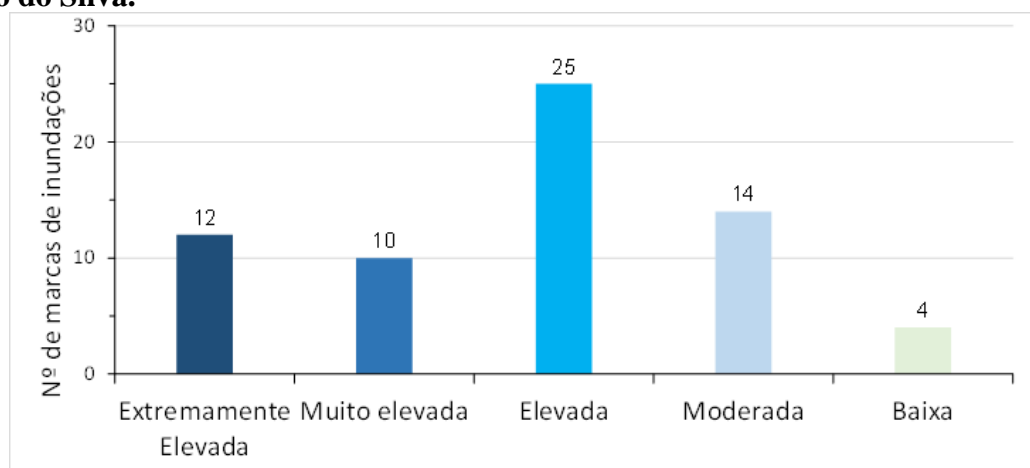
canais de drenagem de baixa suscetibilidade e com o incremento das “surgências” de água, onde se apresentam os maiores totais de CN médio, o modelo aponta aumento do potencial de inundação, alcançando assim a suscetibilidade muito elevada. Esse trecho corresponde a uma planície aluvionar mais larga com significativos registros de marcas de inundações (Figura 5).

Na região da sua foz a suscetibilidade é extremamente elevada com recorrentes inundações em terrenos sob alagamentos permanentes, que sofrem influência da variação da maré. Esta é a área de maior acumulação de escoamento superficial que recebe toda a contribuição das drenagens de montante da bacia hidrográfica, onde se apresentam elevados valores de CN médio em área plana, tendo assim o maior potencial de inundação da bacia hidrográfica do riacho do Silva (Figura 5).

### Interação espacial dos níveis de suscetibilidade e os registros de inundações

Em relação aos níveis de suscetibilidade e marcas de inundações, foram identificadas, no total, 57 marcas de inundações inventariadas (Figura 6). As marcas referentes ao nível de suscetibilidade extremamente elevada foram identificadas em imagens de satélite de 28 de maio de 2018 na região da foz e alcançou, em abril/2021, o nível d’água de aproximadamente 1,2 m. Quanto aos níveis de suscetibilidade muito elevada em planície fluvial mais larga (quadrante “B” na Figura 5), apresentaram marcas nas edificações em locais próximos aos cursos de água e nos limites da área de inundação fluvial; o nível de suscetibilidade elevada coincide majoritariamente com as marcas de inundações inventariadas (Figura 6).

**Figura 6: Níveis de suscetibilidade e registros de inundações na bacia hidrográfica do riacho do Silva.**



Partes dessas marcas de inundações correspondem a locais que tiveram casas arrastadas por se situarem no leito de inundação de elevada suscetibilidade onde foram constatadas altura

de água de aproximadamente 1,0 m (Quadrante “B” da Figura 5). Em relação ao nível de suscetibilidade moderada, as marcas de inundações foram registradas na grotta Santa Helena onde se constatou altura d’água de aproximadamente 0,45 a 0,5 m em abril/2021 (Quadrante “A” da Figura 5 e Figura 6).

### Exposição às inundações

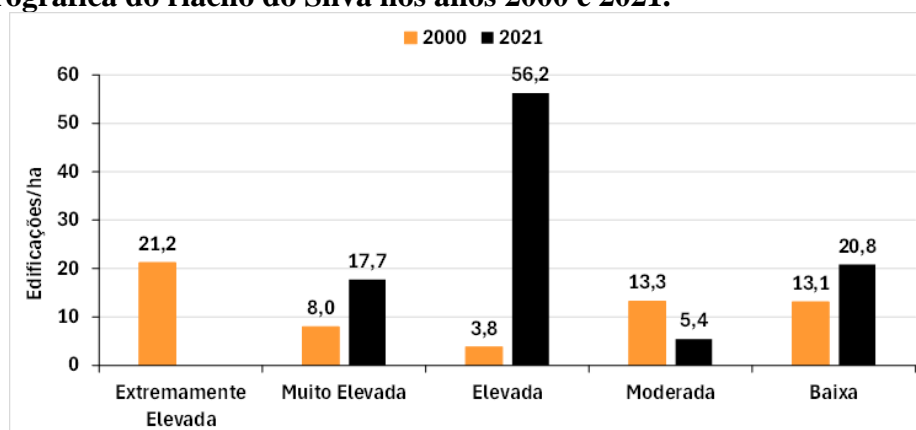
De acordo com os níveis de suscetibilidade apontados pelo modelo e a localização das edificações nos anos 2000 e 2021, se constata aumento da densidade de edificações em 21 anos expostas às inundações em níveis elevado e muito elevado de acumulação do escoamento superficial na bacia hidrográfica considerada, denotando a ocupação das áreas próximas ao canal fluvial com expansão urbana (Tabela 2 e Figura 7).

**Tabela 2: Suscetibilidade e totais das classes, de edificações, densidade das edificações em níveis de suscetibilidade nos anos 2000 e 2021.**

Suscetibilidade	Níveis	Área Inud* (ha)	Ano 2000		Ano 2021	
			Nº Edf**	Edf./ha Inud	Nº Edf.	Edf./ha Inud
Extremamente Elevada	5	8,91	189	21,2	---	---
Muito elevada	4	12,2	97	8,0	141	17,7
Elevada	3	29,3	112	3,8	215	56,2
Moderada	2	8,0	106	13,3	72	5,4
Baixa	1	17,1	224	13,1	273	20,8

Inud\*: Inundação; Edf\*\*: Edificações; ha: Hectares.

**Figura 7: Evolução da densidade de edificações/hectares e níveis de suscetibilidade na bacia hidrográfica do riacho do Silva nos anos 2000 e 2021.**

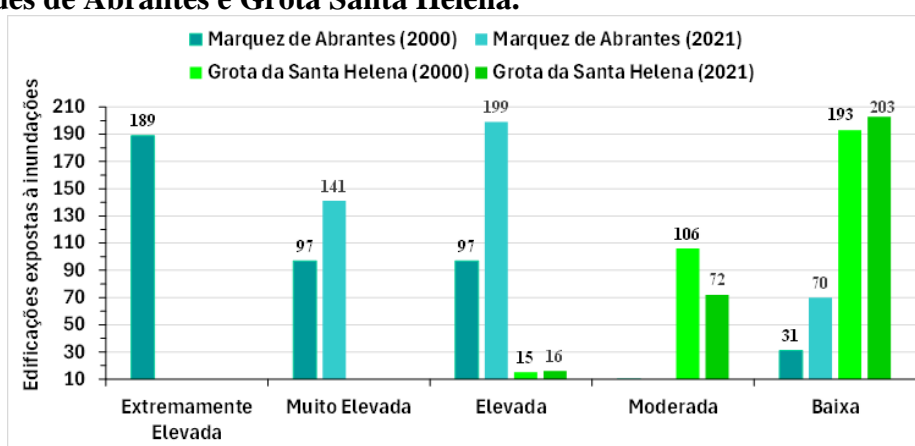


As edificações expostas no nível moderado apresentaram decréscimo devido as demolições e arruinamento desses assentamentos precários e, no nível extremamente elevado,

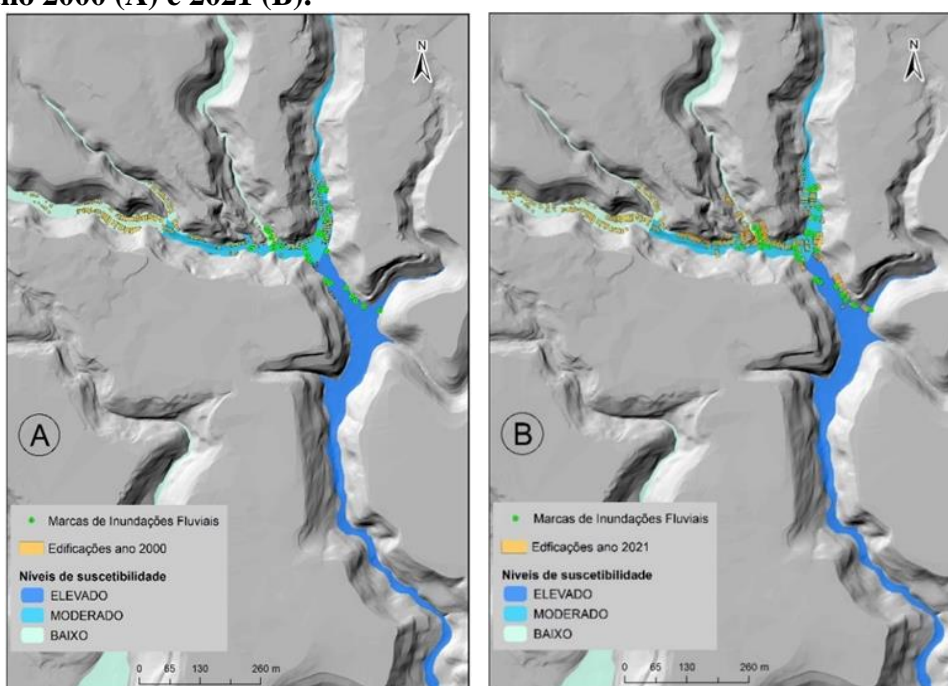
as edificações foram realocadas em 2021 por ação preventiva da defesa civil que retirou as pessoas desse setor da foz da bacia devido à subsidência do solo; em áreas de nível baixo de suscetibilidade à inundação constatou-se aumento da densidade de edificações (Tabela 2 e Figura 7).

A densidade de edificações cresceu ao longo dos 21 anos nas áreas de nível elevado e muito elevado de suscetibilidade às inundações (Figura 8). Tal aumento da exposição das edificações às inundações são constatados em dois setores da bacia hidrográfica: um, na grota Santa Helena (Figura 9 A e B) e outro, na Marquês de Abrantes (Figura 10 A e B).

**Figura 8: Totais e níveis de exposição das edificações às inundações nos anos 2000 e 2021 em Marquês de Abrantes e Grota Santa Helena.**

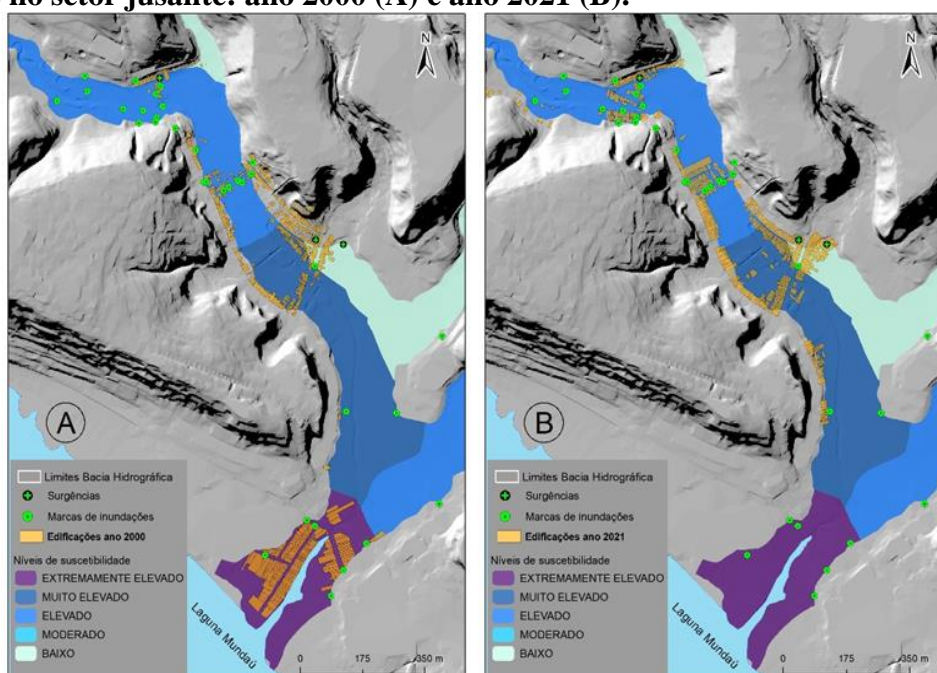


**Figura 9: Níveis de suscetibilidade e edificações expostas às inundações na grota Santa Helena: ano 2000 (A) e 2021 (B).**



A Marquês de Abrantes apresenta maior exposição na bacia hidrográfica. A concentração habitacional (Edf/ha) aumentou significativamente de 2000 a 2021 nos níveis elevado a muito elevado, sobretudo próximo ao canal fluvial (Figuras 8 e 10 A e B). Em 2021, se comprova a expansão da ocupação habitacional em zonas potenciais de inundação (Figura 10 A e B). No setor próximo a foz, a exposição em 2000 é extremamente elevada, mas com a retirada das pessoas e demolição das edificações essa área passa ter exposição nula em 2021.

**Figura 10. Níveis de suscetibilidade e edificações expostas às inundações na Marquês de Abrantes no setor jusante: ano 2000 (A) e ano 2021 (B).**



## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Em relação ao tema em estudo, suscetibilidade a inundações, não foram encontrados artigos ou mesmo pesquisas realizadas na cidade de Maceió, excetuando-se a carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação do município de Maceió – AL (CPRM, 2014). Nesse trabalho, a escala utilizada, 1/70.000, não permitiu apresentar a suscetibilidade a inundações na bacia do Riacho do Silva.

O modelo conceitual utilizado nesse trabalho (REIS, 2011), identificou na bacia hidrográfica do riacho do Silva, os níveis de suscetibilidade pelo escoamento superficial concentrado, essencialmente, nos cursos d'água e áreas adjacentes pela integração das variáveis

acumuladas por Análise Multicritério (AMC) e os resultados classificados por desvio padrão. Além disso, é identificada a exposição a inundações ao longo dos 21 anos. Dessa maneira, se diferencia da metodologia utilizada por outros autores como Moura et al. (2019) e Cury et al. (2021) que adotaram o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), onde os resultados foram definidos manualmente em 5 e 3 classes, respectivamente, e o maior peso foi alcançado pela variável declividade. Utilizando o método de razão de frequência (*Frequency Ratio - FR*), Chaves et al. (2021) definiram 5 classes de suscetibilidade, com maior peso para o uso do solo. No caso de Martins e Ribas (2021), com o uso do modelo Hand (*Height Above Nearest Drainage*), a suscetibilidade é determinada com base na altimetria e os resultados classificados em 3 níveis de suscetibilidade por intervalos iguais.

O que se observa nos trabalhos supracitados, diferentemente do modelo conceitual de Reis (2011), os métodos AHP e FR apresentam os resultados da suscetibilidade não apenas nos cursos d'água e áreas adjacentes, e sim em toda a área da bacia hidrográfica que implica em alcançar, pontualmente, os níveis elevados de suscetibilidade não apenas nos cursos d'água e áreas adjacentes, mas também em áreas potenciais de geração do escoamento superficial (em declives elevados e interflúvios) e áreas de alagamentos (em topos de morros planos), principalmente no modelo de Chaves et al (2021) devido o maior peso alcançado pelo uso do solo. E os resultados obtidos pelo modelo Hand (*Height Above Nearest Drainage*) representam a suscetibilidade nos cursos d'água e áreas adjacentes e diferem do modelo conceitual de inundações de Reis (2011) no qual, a priori, o maior peso é dado à variável “Área Acumulada” na determinação do escoamento superficial concentrado.

Pelos resultados do modelo conceitual, os níveis de suscetibilidade elevado a muito elevado predominam nas drenagens fluviais na metade inferior da bacia hidrográfica do riacho do Silva e a exposição cresce com a ocupação de moradias nas áreas ribeirinhas. Devido à falta de recursos financeiros e programas habitacionais, como também a adaptação da população ao local com os serviços no entorno, ocupam e permanecem nessas áreas suscetíveis à inundações, essencialmente, na Grota Santa Helena e na Marquês de Abrantes.

Na grota Santa Helena, a canalização dos rios aumenta a velocidade do escoamento superficial concentrado em trechos com níveis de suscetibilidade a inundações moderado a elevado e expõem as moradias e populações ribeirinhas que sofrem com as inundações. A exemplo, a inundações ocorrida nos dias 14 e 15 de abril de 2021, com acumulado de chuva de 132,8 mm. Nesse setor, os canais fluviais são rasos, assoreados e perdem a capacidade de



condução da massa de água que resulta no transbordamento do leito fluvial, aumentando a exposição das populações ribeirinhas de baixo poder aquisitivo.

Na Marquês de Abrantes, o nível moderado de suscetibilidade corresponde às áreas sem ocupação humana, com vegetação densa e, para jusante, a suscetibilidade torna-se elevada num setor mais sinuoso do rio, em planície fluvial mais longa e larga, onde há ocupação humana em leito fluvial com significativos registros de inundações e danos severos. Além disso, as surgências de água no sopé de taludes ocorrem, provavelmente, devido ao corte do talude, fluem e afloram nas moradias locais. Neste setor, a suscetibilidade aumenta para muito elevada em solos encharcados e nível do lençol freático alto, onde há habitações expostas à inundações.

Na região da foz, as inundações são recorrentes anualmente no período chuvoso onde o escoamento concentrado é mais forte associado a pavimentação e impermeabilização do solo nesse setor da bacia, com confinamento do rio e assoreamento contribuindo para o transbordamento num setor sob influência da entrada da maré que eleva ainda mais o nível de água nesse setor de suscetibilidade extremamente elevada. Nessa área, as inundações têm causado frequentemente interrupção do fluxo de transporte local.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse estudo mostra-se relevante por delimitar as áreas potenciais de ocorrência de inundações na bacia hidrográfica do riacho do Silva e por contabilizar edificações expostas às inundações ao longo de 21 anos, dado o nível de escala em detalhe da informação cartográfica utilizada. Torna-se importante ferramenta para a gestão do risco de inundações, fornecendo uma base para definição de medidas de mitigação tais como: limpeza e desassoreamento dos canais fluviais e identificação das ocupações humanas expostas às inundações e que habitam os leitos com potencial à inundações de moderada a extremamente elevada, sendo auxílio para medidas preventivas de perdas de vidas e danos materiais. Nesse caso, a suscetibilidade é o primeiro passo para gestão dos riscos na bacia hidrográfica do riacho do Silva, visto que não há monitoramento hidrológico que permita compor um sistema de alerta de inundações em tempo real.

## REFERÊNCIAS

BARROS, A. H. C. *et al.* Climatologia do estado de Alagoas. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2012.

BHUYAN, K. *et al.* Mapping and characterising buildings for flood exposure analysis using open-source data and artificial intelligence. *Natural Hazards*, p.1-31, set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05612-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-022-05612-4>. Acesso em: 05 out 2022.

CHAVES, H. L. O. *et al.* Mapeamento de suscetibilidade à inundação utilizando o método da razão de frequência aplicado à bacia do riacho fundo-distrito federal. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, p. 148-166, 2021.

CLUBB, F. J. *et al.* Geomorphometric delineation of floodplains and terraces from objectively defined topographic thresholds. *Earth Surface Dynamics*, v,5, p.369-385, jul.2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-5-369-2017>. Disponível em: <https://esurf.copernicus.org/articles/5/369/2017/esurf-5-369-2017.html>. Acesso em: 08 fev 2021.

CPRM-Serviço Geológico do Brasil. Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Maceió, SC.25-V-C-IV-2, ESCALA 1:70.000, agosto, 2014. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22825>. Acesso em: 16 maio 2024.

CRONSHEY, R. G. *et al.* Urban hydrology for small watersheds, Technical Report 55. United States Department of Agriculture (USDA), 164p, 1986. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML1421/ML14219A437.pdf>. Acesso em: 20 mar.2022.

CURY, M.D. *et al.* Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação como informação para o planejamento e a gestão territorial em bacia hidrográfica. *Caminhos de Geografia*, v. 22, n. 83, p. 160-175, 2021.

DE RISI, R. *et al.* Delineation of flooding risk hotspots based on digital elevation model, calculated and historical flooding extents: the case of Ouagadougou. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v.32, n.6, p.1-15, ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s0477-017-1450-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00477-017-1450-8>. Acesso em: 18 abril 2021.

DIKAKAKIS, M. *et al.* Factors controlling the spatial distribution of flash flooding in the complex environment of a metropolitan urban area. The case of Athens 2013 flash flood event. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v.18, p.171-180, set.2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.06.10>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>. Acesso em: 17 junho 2021.

DOTTORI, F., MARTINA, M. L. V., FIGUEIREDO, R. A methodology for flood susceptibility and vulnerability analysis in complex flood scenarios. *Journal of Flood Risk Management*, v,11, p.632-645, jan.2016. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12234>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jfr3.12234>. Acesso em: 10 jan 2022.

EL-HADDAD, B. A. *et al.* Flood susceptibility prediction using four machine learning techniques and comparison of their performance at Wadi Qena Basin, Egypt. *Natural Hazards*, v.105, p.83-114, jan.2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04296-y>. Disponível em:

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-020-04296-y#citeas>. Acesso em: 20 maio 2022.

FACCINI, F. *et al.* Role of rainfall intensity and urban sprawl in the 2014 flash flood in Genoa City, Bisagno catchment (Liguria, Italy). *Applied Geography*, v.98, p.224-241, set.2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014362281730365X?via%3Dihub>. Acesso em: 23 jul 2021.

GAMA, W. M., FALCÃO, N. A. M. Suscetibilidade a deslizamentos pelo método estatístico bivariado na bacia hidrográfica do riacho do Silva, Maceió, Alagoas, Brasil. *Revista Contexto Geográfico*, v.8, n.16, p. 46–61, ago.2023. DOI: <https://doi.org/10.28998/contegeo.8i16.15478>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/view/15478>. Acesso em 22 jan 2024.

GAMA, W.M. Análise Multi – Perigo de fenómenos naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú, Brasil. 2021. Tese (Doutorado em Geografia Física) – Instituto Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa, Portugal.

GIOVANNETTONE, J. *et al.* A statistical approach to mapping flood susceptibility in the Lower Connecticut River Valley Region. *Water Resources Research*, v.54, n.10, p.7603-7618, set.2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018WR023018>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/>. Acesso em: 01 nov 2021.

GOUMRASA, A. *et al.* Flood hazard susceptibility assessment in Chiffa Wadi watershed and along the first section of Algeria North-South highway using GIS and AHP method. *Applied Geomatics*, v.13, p.565-585, junho.2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12518-021-00381-4>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12518-021-00381-4>. Acesso em: 03 ago 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1961 – 1990; 1981 – 2010; 1991 – 2020; Edição digital. Brasília. 2009; 2018; 2022.

IRDR - Integrated Research on Disaster Risk. Perfil Classification and Hazard Glossary (IRDR DATA Publication No. 1). 2014. Disponível em: <https://council.science/wp-content/uploads/2019/12/Peril-Classification-and-Hazard-Glossary-1.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2024.

JACINTO, R. *et al.* Continental Portuguese territory flood susceptibility index-contribution to a vulnerability index. *Natural Hazards and Earth*. v.15, n.8, p.1907-1919, ago.2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1907-2015>. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/15/1907/2015/>. Acesso em: 03 mar 2020.

JENSON, S. K., DOMINGUE J.O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, Photogrammetric engineering and remote sensing, v.54, n.11, p. 1593-1600, mês.1998. Disponível em: [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/nov/1988\\_nov\\_1593-1600.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/nov/1988_nov_1593-1600.pdf). Acesso em: 06 maio 2023.

KAPPES M.S. *et al.* The Multirisk Platform: The Technical Concept and Application of a Regional-Scale Multihazard Exposure Analysis Tool. *Geomorphology*, v.151-152, n.15, p.139-155, maio.2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.024>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>. Acesso em: 03 mar 2021.

KUNDZEWICZ, Z. W. Floods and flood protection: business-as-usual?. *Iahs Publication*, v.286, p.201-209. 2004.

KUNDZEWICZ, Z. W. *et al.* Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal* v.59,n.1, p.1-28, dec.2013 DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02626667.2013.857411>. Acesso em: 14 set 2021.

LASTRA, J.*et al.* Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula 45, 277-293, fev. 2008 DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9164-8>.

MARTINS, M.O., RIBAS, R. P. Identificação de áreas de suscetibilidade à inundação no sistema hidrográfico do Rio Tavares em Florianópolis–SC. *Geosul*, v. 36, n. 79, p. 473-494, 2021.

MOURA, M. M. *et al.* Suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Piratini-RS. *Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade*, v. 6, n. 2, p. 17-25, 2019.

MSABI, M. M., MAKONYO, M. Flood susceptibility mapping using GIS and multi-criteria decision analysis: a case of Dodoma region, central Tanzania. *Remote Sensing Applications. Society and Environment*, 21, p.1-25, nov.2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100445>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S23523852000161>. Acesso em: 10 set 2021.

NAJIBI, N., DEVINENI, N. Recent Trends in Frequency and Duration of Global Floods. *Earth System Dynamics Discussions*, 9, n.2, p.757-783, jun.2018 DOI: <https://doi.org/10.5194/esd-9-757-2018>. Disponível em: <https://esd.copernicus.org/articles/9/757/2018/>. Acesso em: 07 jul 2021.

OVEREEM, I., KETTNER, a. J. SYVITSKI, J. P. M. Impacts of humans on river fluxes and morphology. *Treatise Geomorphology*. v.9, p. 828-842, mar.2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00267-0>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>. Acesso em: 2 set 2021.

PARAHYBA, R. *et al.* Solos do Município de Maceió-AL. Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças climática, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/337717/1/trab6668397.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

REIS, E. Análise de bacias hidrográficas, suscetibilidade à ocorrência de cheias e Sistemas de Informação Geográfica: da definição do quadro conceptual até à proposta de um modelo de

avaliação. VIII Congresso da Geografia Portuguesa, Repensar a Geografia para Novos Desafios, Comunicações, Lisboa, pp. 1 – 6, 2011.

RENTSCHLER, J., SALHAB, M., JAFINO, B. A. Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature communications*, v.13, n.1, p.1-11, jun.2022. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30727-4>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-022-30727-4>. Acesso em: 07 out 2022.

SAMANTA, S., PAL, D. K., SAMANTA, B. Flood susceptibility analysis through remote sensing , GIS and frequency ratio model. *Applied Water Science* v.8, n.66, p.1-14, abril.2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0710-1>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-018-0710-1>. Acesso em: 15 jan 2023.

SANTANGELO, N. *et al.* Flood susceptibility assessment in a highly urbanized alluvial fan: The case study of Sala Consilina (southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, v.11, n.10, p.2765-2780, out.2011. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-11-2765-2011>. Disponível em: <https://nhess.copernicus.org/articles/>. Acesso em: 6 fev 2022.

SANTOS, P.P., REIS, E. Assessment of stream flood susceptibility: a crossanalysis between model results and flood losses. *Journal of Flood Risk Management*. v.11, n.S2, p. 1-13. Jan.2017. DOI:<https://doi.org/10.1111/jfr3.12290>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jfr3.12290>. Acesso em: 01 mar 2020.

SHAFIZADEH-MOGHADAM, H. *et al.* Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping. *Journal of environmental management*, 217, 1-11, jul.2018 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.089>.

SHEN, S. M. Delineation of historical fluvial territories and the implications for flood mitigation, with reference to four selected reaches in Taiwan. *Geomorphology and Society* 83-102, jun.2016 DOI: [https://doi.org/10.1007/978-4-431-56000-5\\_6](https://doi.org/10.1007/978-4-431-56000-5_6).

SMITH, W. S., SILVA, F. L. D., BIAGIONI, R. C. River dredging: when the public power ignores the causes, biodiversity and science. *Ambiente & Sociedade*, 22, 2019 DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0057r1vu1911ao>.

SUPPAWIMUT, W. GIS-based flood susceptibility mapping using statistical index and weighting factor models. *Environment and Natural Resources Journal*, 19, 481-493, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32526/enrj/19/2021003>.

TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water resources research*, v. 33, n. 2, p. 309-319, fev.1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/>. Acesso em: 13 maio 2023.

TEHRANY, M. S. *et al.* Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environmental earth sciences*, 72, 4001- 4015, maio.2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3289-3>.

TELLMAN, B. *et al.* Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods. *Nature*. v.596, p.80-86, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03695-w>.

TIRYAKI, M., KARACA., O. Flood susceptibility mapping using GIS and multicriteria decision analysis: Saricay-Çanakkale (Turkey). *Arabian Journal of Geosciences* 11, 1-17, jul.2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3675-3>.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina 2013. Atlas Brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012. Minas Gerais.

UNISDR - United Nations Office on Disaster Risk Reduction. Terminology on Disaster Risk Reduction Geneva, 2009.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Governance System, Methodologies, and Use of Results. Geneva. 2017.

UNISDR/CRED- United Nations Office for Disaster Risk Reduction. The human cost of weather related disaster, 1995 – 2015. CRED- Center for Research on the Epidemiology of Disaster, 2015. Disponível em: <https://www.unisdr.org>. Acesso em: 16 fev 2023.

***Recebido em Junho de 2023***

***Aprovado em Abril de 2024***

***Publicado em Agosto de 2024***