



## Modelagem espacial de áreas suscetíveis a inundações em um modelo multicritério híbrido e Sistema de Informação Geográfica: um estudo de caso aplicado a bacia do Rio Bengalas

Fabiano Peixoto Freiman<sup>1</sup>, Camila de Oliveira Carvalho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.e. em Ciências Geodésicas (UFPR), Professor Assistente I, Departamento de Engenharia de Transportes e Geodésia, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Rua Prof. Aristides Novis, 2, Federação, Salvador, BA, CEP 40210-630. [fabiano.freiman@ufba.br](mailto:fabiano.freiman@ufba.br) (autor correspondente). <sup>2</sup> Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Departamento de Engenharia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, BR 465, km 7, Seropédica, RJ, CEP 23890-000.

Artigo recebido em 17/11/2019 e aceito em 24/03/2020

### RESUMO

A identificação de áreas suscetíveis a inundações é essencial para o gerenciamento de desastres e definição de políticas públicas. O objetivo deste trabalho é a apresentação de um método para identificação de áreas suscetíveis a inundações através da integração de informações geográficas provenientes de técnicas do Sensoriamento Remoto, as ferramentas do Sistema de Informação Geográfica (SIG), a lógica Fuzzy e a aplicação de Métodos de Análise Multicritério (MAM) *Analytical Hierarchy Process* (AHP). Para atingir o objetivo foi proposto um estudo de caso, localizado na Bacia do Rio Bengalas, nos municípios de Nova Friburgo e Bom Jardim (Região Serrana do Rio de Janeiro). A modelagem espacial multicritério foi realizada a partir da seleção de um conjunto de dados composto por informações geomorfológicas, hidrológicas e de uso e ocupação do solo. Como resultado, obteve-se um mapa de suscetibilidade a inundações para a região. A coerência do modelo gerado foi verificada a partir do histórico de inundações da bacia do Rio Bengalas. A metodologia, apresentou-se eficiente e adequada para a determinação de áreas suscetíveis a inundações, prevendo com sucesso a distribuição espacial de áreas com riscos a inundações.

Palavras-chave: suscetibilidade a inundações. Lógica Fuzzy. MAM. AHP. SIG.

### Spatial modelling of flood-susceptible areas based on a hybrid multi-criteria model and Geographic Information System: a case study applied to the Bengalas River basin

### ABSTRACT

The identification of areas susceptible to flooding is essential for disaster management and public policy making. The objective of this work is the presentation of a method for the identification of areas susceptible to floods through the integration of geographic information from Remote Sensing techniques, Geographic Information System (GIS) tools, Fuzzy logic and the application of Multicriteria Analysis Methods (MAM) *Analytical Hierarchy Process* (AHP). In order to achieve the objective, a case study was proposed, located in the Bengalas River Basin, in the municipalities of Nova Friburgo and Bom Jardim (Mountain Region of Rio de Janeiro). Multicriteria spatial modeling was performed by selecting a data set composed of geomorphological, hydrological and land use information. As a result, a flood susceptibility map was obtained for the region. The coherence of the generated model was verified from the flood history of the Bengalas River basin. The methodology was efficient and adequate for the determination of areas susceptible to floods, successfully predicting the spatial distribution of areas at risk of flooding.

Keywords: flood susceptibility. Fuzzy logic. MAM. AHP. GIS.

### Introdução

Desastres naturais causam danos e sofrimento para a população, principalmente em países em desenvolvimento e com recursos financeiros limitados (Koriche; Riwntjes, 2015). Segundo o Centro de Pesquisa de Epidemiologia

dos Desastres (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (Cred, Unisdr 2015) entre os anos de 1995 e 2015, as inundações são os desastres com maior número de ocorrências, causando danos econômicos e sociais.

Estes danos, podem ser minimizados a partir da execução de uma análise de suscetibilidade a inundações e a geração de modelos precisos é o principal objetivo de cientistas e governantes (Tehrany, Pradhan e Jebur, 2014) para auxiliar no processo de tomada de decisão e determinação de políticas públicas.

No contexto da modelagem espacial (geração de modelos), a integração de dados provenientes do Sensoriamento Remoto, as ferramentas do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Métodos de Análise Multicritério (MAM) trazem benefícios para o gerenciamento dos riscos e possibilita, conforme Malczewski (2006), a construção de cenários espacializados.

A combinação de um MAM e o SIG (Modelagem Espacial Multicritério - MEM), permite a organização sistemática de dados, suposições, geração e compartilhamento de conhecimento para a gestão operacional ou desenvolvimento de políticas estratégicas. A MEM é um processo científico de simplificação da realidade e pode ser utilizada para prever comportamentos e testar hipóteses acerca de uma temática específica (Jakeman et al., 2008).

A utilização de MAMs para a construção de modelos espaciais apresenta o problema relacionado a subjetividade, ou seja, a qualidade do modelo está diretamente interligada com as experiências do analista e de sua percepção em relação ao contexto a ser modelado. Para contornar este problema, novas abordagens foram propostas, como a utilização de Redes Neurais (Artificial Neural Network - ANN) (KIA et al., 2012), métodos probabilísticos (Tehrany, Pradhan e Jebur, 2013; Tehrany; Pradhan e Jebur, 2014 e Tang et al., 2018), técnicas de aprendizagem de máquina (Khosravi et al., 2019) e a utilização de MAM híbridos (Papaioannou, Vasiliades e Loukas, 2014; Wang et al., 2011).

Neste contexto, o presente trabalho busca a aplicação do processo de MEM para a identificação de áreas suscetíveis a inundações. Para a minimização da subjetividade foi empregado um MAM híbrido (a teoria *fuzzy* associado ao método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980)).

Os objetivos específicos deste trabalho são: 1) definir as relações e ponderações de cada critério utilizado no processo de modelagem e; 2) Construir o Modelo de suscetibilidade a inundações usando o modelo Fuzzy-AHP e; 3) investigar a qualidade dos resultados obtidos com a aplicação desta técnica.

A contribuição do estudo está relacionada a aplicação de um MAM para a identificação de áreas suscetíveis a inundações que pode ser

utilizada em qualquer região, sem necessidade de dados históricos de inundações. A utilização de um método híbrido permite minimizar a subjetividade do processo de ponderação das variáveis consideradas na análise espacial e construção de um modelo consistente de suscetibilidade a inundações.

#### *Estudos relacionados*

No processo de modelagem espacial multicritério o método *Analytical Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Saaty (1980), é amplamente utilizado (Ouma; Tateishi, 2014; Papaioannou; Vasiliades e Loukas, 2014) devido sua simplicidade matemática e fácil implementação. A desvantagem do AHP está associada a incerteza (subjetividade) das ponderações atribuídas por analistas. Porém, quando comparado com os demais MAM, segundo Saaty (1980), apresenta a vantagem de possibilitar a checagem da consistência das ponderações.

Meyer, Schuer e Haase (2008) utilizaram o SIG associado ao MAM de Ponderação Aditiva Simples (Simple Additive Weighting - SAW). A principal desvantagem do método é a impossibilidade de checar as ponderações e correção de possíveis erros no processo de modelagem. Para minimizar as inconsistências Tang et al. (2018) associaram o método SAW à ferramenta probabilística Monte Carlo.

Tehrany, Pradhan e Jebur (2014), utilizaram a inferência bayesiana e a técnica de Máquinas de Vetores de Suporte (Support Vector Machine - SVM) para identificação de áreas suscetíveis a inundações. A vantagem desta proposta é a eliminação do processo de ponderação e em consequência a minimização de erros inerentes a subjetividade dos MAMs.

Khosravi et al. (2019) realizaram uma comparação exploratória dos MAMs SAW, *Technique for Order of Preference by Similarity* (TOPSIS) e o *Vise Kriterijumska Optimizacija i Kompromisno Resenje* (VIKOR) com duas técnicas de aprendizagem de máquina *Naive Bayes Tree* (NBT) e *Naive Bayes* (NB), obtendo melhores resultados com a aplicação do método NBT, por ser um modelo híbrido. Kia et al. (2012), para identificação de áreas suscetíveis a risco de inundações aplicou o algoritmo ANN associado ao SIG. Segundo os autores, a técnica possibilitou a geração de modelos precisos e especialmente bem representados.

Em todos os trabalhos listados no estado da arte, pode-se observar que o processo de definição de áreas suscetíveis a inundações é complexo e os métodos apresentam limitações. Segundo Kanani-

Sadat et al. (2019), os processos baseados em aprendizagem de máquinas, apesar de eliminar a subjetividade do processo, necessita de informações geográficas dos pontos de ocorrências de inundações o que torna a metodologia impraticável em regiões que não apresentem dados históricos. O mesmo problema ocorre com a utilização da inferência bayesiana.

Em relação aos MAMs a desvantagem está relacionada a subjetividade das ponderações, realizadas por especialistas com pontos de vistas, interesses e objetivos diferentes, sendo a principal fonte de incerteza dos modelos gerados pela aplicação de técnicas multicritério (Kanani et al., 2019). Segundo Papaioannou, Vasiliades e Loukas (2014), a utilização de MAM híbridos, ou seja, a utilização de dois ou mais métodos associados, permite a minimização da subjetividade e a obtenção de resultados consistentes.

*Caracterização da área de estudo*

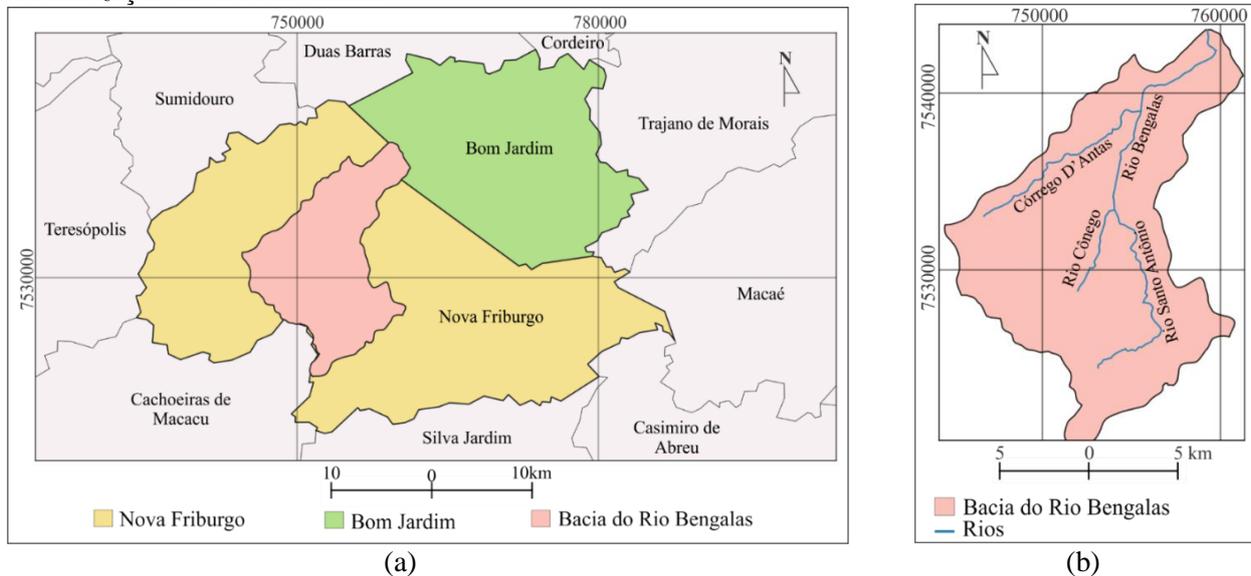


Figura 1 (a) Área de estudo (b) Bacia do Rio Bengala.

**Material e métodos**

A análise de suscetibilidade a inundação foi realizada a partir das características naturais e antropizadas da região de estudo (fatores condicionantes). Neste trabalho foram selecionados 10 fatores condicionantes (Quadro 1) definidos a partir de análises da região de estudo e da aquisição de informações obtidas na revisão de literatura.

Segundo Tehrany, Pradhan e Jebur (2013) os fatores relacionados a topografia são essenciais no processo de modelagem hidrológica para a identificação de áreas suscetíveis a inundações. As informações relacionadas a topografia do terreno foram construídas com base nos dados do projeto *Shuttler Radar Topographic Mission (SRTM) da Natioal Aeronautics and Space Administration*

A Bacia hidrográfica do Rio Bengalas (Figura 1a) se localiza na região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, e abrange parte dos municípios de Nova Friburgo e Bom Jardim (entre os paralelos 22°10' e 22°25' Sul e meridianos 42°37' e 42°27' Oeste), apresentando área de 180 km<sup>2</sup>.

Na região de estudo, encontram-se remanescentes da Mata Atlântica, atividades agrícolas e áreas urbanizadas. No município de Nova Friburgo a mancha urbana se estende principalmente sobre as várzeas dos rios. Este fator associado ao processo de impermeabilização do solo torna a área suscetível a inundações.

O Rio Bengalas é formado no encontro de seus afluentes (Rio Santo Antônio e Córrego) e é abastecido por córregos que nascem nas partes altas dos municípios de sua abrangência (principalmente o Córrego D'Antas), como ilustrado na Figura 1b.

(NASA), disponibilizados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA).

Quadro 1 Fatores geográficos considerados.

Dados	Formato	Escala
Altitude	matricial	1:60000
Declividade	matricial	1:60000
Uso do solo	matricial	1:40000
Distância dos rios	matricial	1:60000
Tipo de solo	vetorial	Não informado
NDVI	matricial	1:40000
Curvatura	matricial	1:60000
Índice topográfico de úmidade	matricial	1:60000

Índice de Potência de escoamento	matricial	1:60000
Índice de transporte de fluxo	matricial	1:60000

A partir destes dados, derivados do SRTM, foram construídas as seguintes camadas: altitude do terreno, declividade, curvatura horizontal, Índice Topográfico de Umidade (TWI), Índice de Potência de escoamento (SPI) e o Índice de Transporte de Fluxo (STI).

A camada de altitude do terreno foi dividida em 8 classes (Figura 2a). O mapa de declividade foi classificado em 6 classes, conforme recomendação da EMBRAPA (1979): plano, suave ondulado, ondulado, forte ondulado, montanhoso e escarpado (Figura 2b). Ambas as camadas foram construídas com 30 m de resolução espacial.

Segundo Valeriano e Carvalho (2003), a primeira derivação de uma superfície é um vetor de duas componentes: declividade e a orientação (aspecto). A segunda derivada representa a curvatura do terreno, expressa em curvatura vertical e horizontal.

A curvatura do terreno reflete a forma da área analisada (Khosravi et al., 2019) e a curvatura horizontal está relacionada ao processo de migração e acúmulo de água no solo através da superfície, proporcionado pela gravidade (Valeriano; Carvalho, 2003). Neste trabalho, a camada de curvatura horizontal (Figura 2c) foi derivada dos dados SRTM, e foi classificada manualmente conforme Valeriano e Carvalho (2003) em: côncavo (valores negativos), convexo (valores positivos) e plano (valores próximos de zero).

O Índice Topográfico de umidade (do inglês Topographic Wetness Index (TWI)) (Figura 2d) é um parâmetro geomorfológico utilizado para avaliar o escoamento de água em estudos relacionados a inundação. Conforme Beven e Kirkby (1979), o TWI é definido como uma função logarítmica da declividade e da área de contribuição, conforme apresentado na Equação 1. Em que  $A_s$  é a área de contribuição e  $B$  é a declividade do terreno (expressa em radianos).

$$TWI = \ln \left( \frac{A_s}{\tan B} \right) \quad (1)$$

O índice de Potência de Escoamento (do inglês Stream Power Index (SPI)) representa o potencial da topografia para concentrar grandes quantidades de água superficial (Wilson; Gallant, 2000). O SPI (Figura 2e) é obtido a partir da Equação 2, como segue:

$$SPI = A_s \tan B \quad (2)$$

O Índice de Transporte de Fluxo (do inglês Stream Transport Index (STI)), segundo Wilson e Gallant (2000) representa a capacidade de transporte de sedimentos do terreno. O STI é utilizado para avaliar a erosão do solo e é responsável pela convergência e divergência do fluxo de água e conseqüentemente afeta a ocorrência de inundações. Conforme Wilson e Gallant (2000) o STI (Figura 2f) pode ser determinado a partir da Equação 3, como segue:

$$STI = \left( \frac{A_s}{22,13} \right)^{0,6} \left( \frac{\sin B}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (3)$$

Além dos fatores relacionados a topografia da região, foi construído um mapa de uso e ocupação do solo (Figura 2g) a partir de imagens de satélites Sentinel-2, com resolução espacial de 20 m, obtidas no site da United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Esta camada é importante no processo de definição de áreas suscetíveis a inundações devido a possibilidade de identificação de áreas com altos níveis de impermeabilização do solo, fator que dificulta o processo de escoamento e infiltração da água. Conforme Kazakis, Kougias e Patsialis (2015), enquanto áreas de floresta auxiliam no processo de infiltração da água no solo, áreas urbanas e de pastagem são suscetíveis ao escoamento superficial.

O mapa de uso e ocupação do solo foi construído a partir da classificação supervisionada, sendo definidas 5 classes: área urbana, florestas, rocha, agricultura/pecuária e vegetação rasteira. A partir de imagens Sentinel 2, foi também construída uma camada do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (do inglês Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)) (Figura 2h), obtida através da Equação 4, como segue:

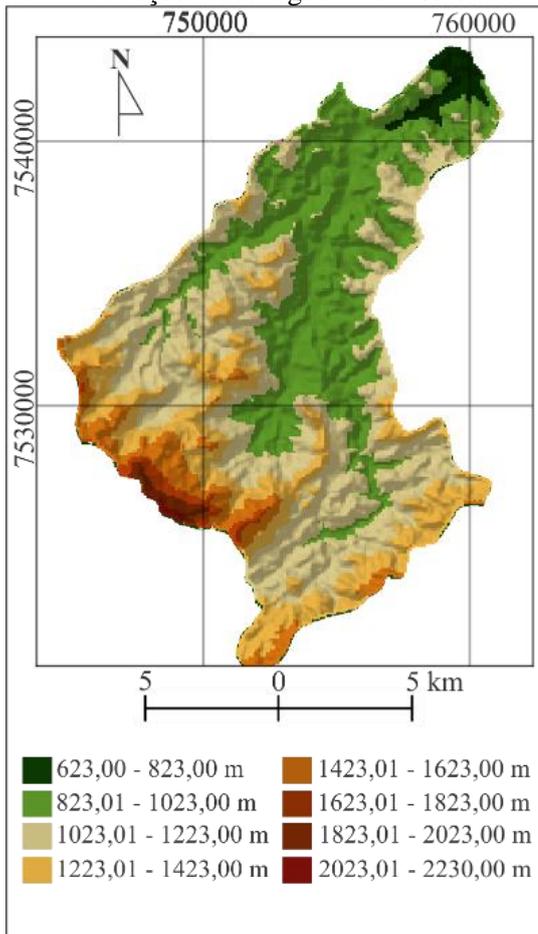
$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad (4)$$

Em que  $NIR$  é a reflectância da banda do infravermelho próximo (banda 8) e  $R$  a reflectância da banda do vermelho (banda 4). O NDVI foi utilizado para a realização da análise das áreas que apresentam maiores níveis de vegetação. Ainda como apresentado na Figura 2i, foi utilizada uma camada relacionada a distância dos principais rios da região de estudo, uma vez que áreas mais próximas apresentam maior suscetibilidade a inundações.

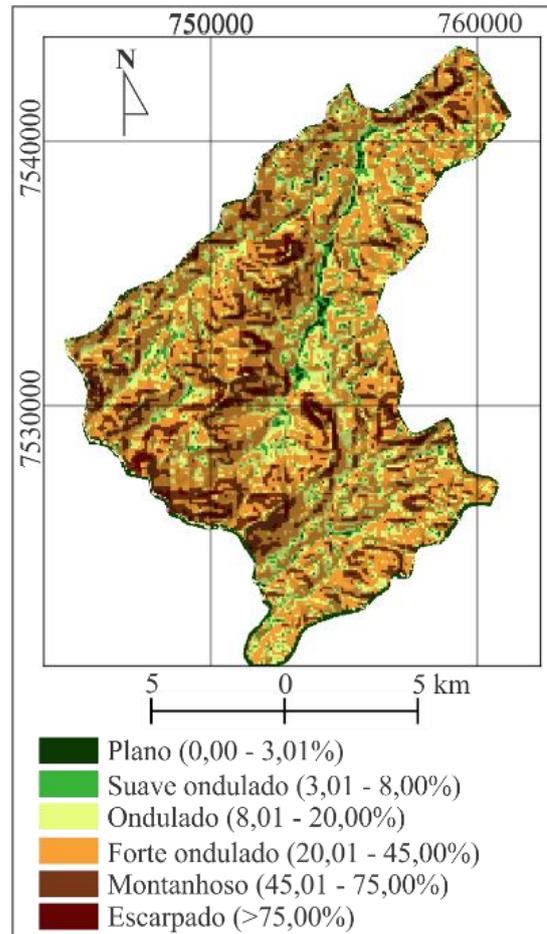
Por fim, foi aplicada a camada de tipo de solo. Conforme Kakazis, Kougias e Patsialis

(2015), este fator deve ser considerado devido a sua alta correlação com o processo de escoamento superficial e infiltração da água no solo

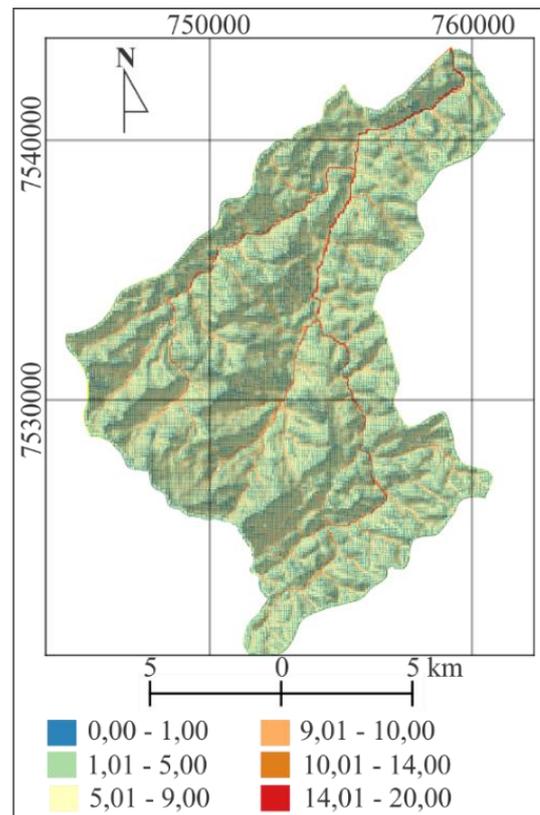
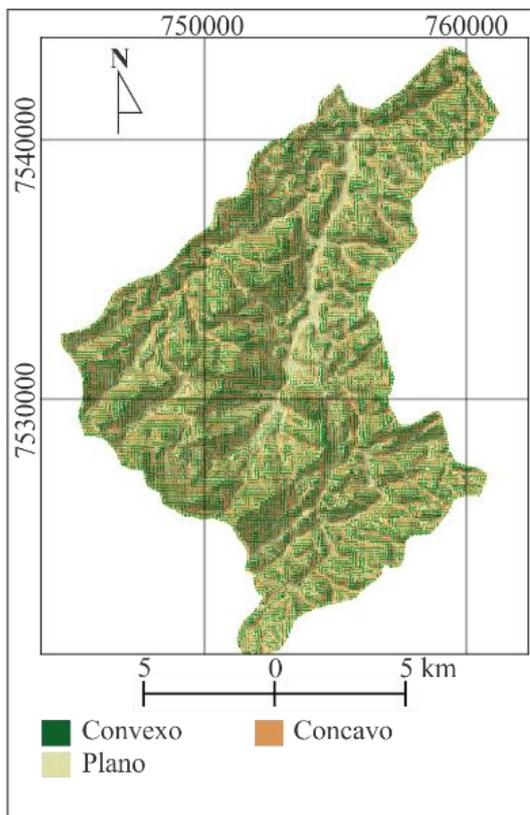
(Informações obtidas na plataforma GEOINFORM em formato vetorial).



(a)



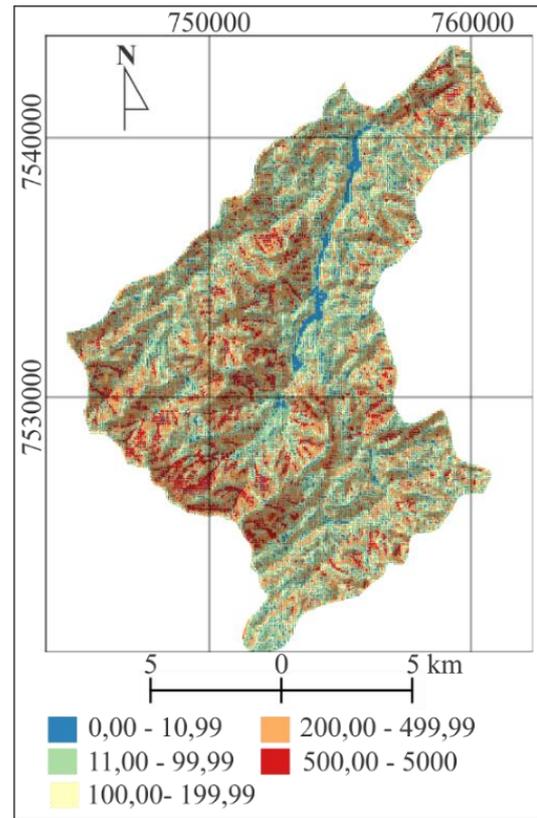
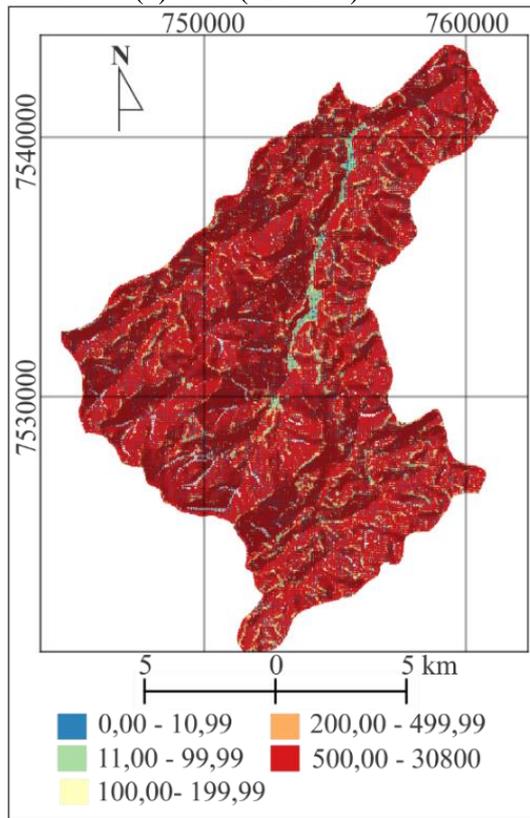
(b)



(c)

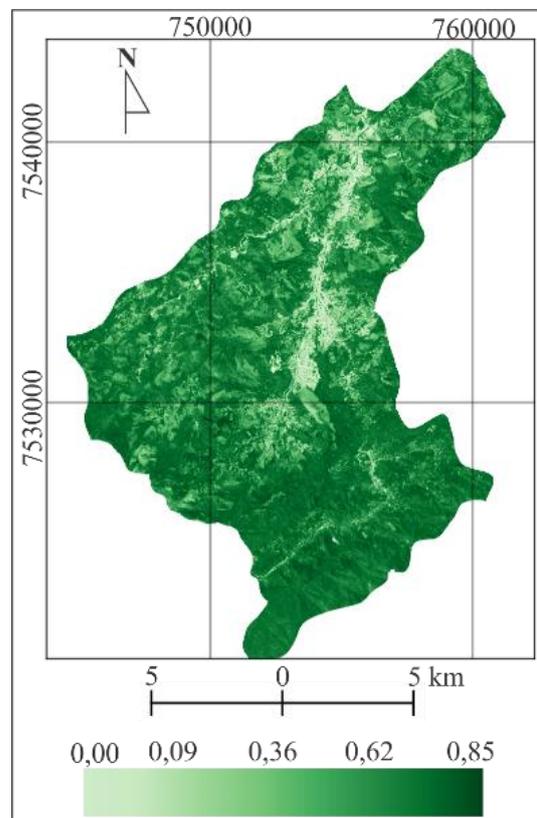
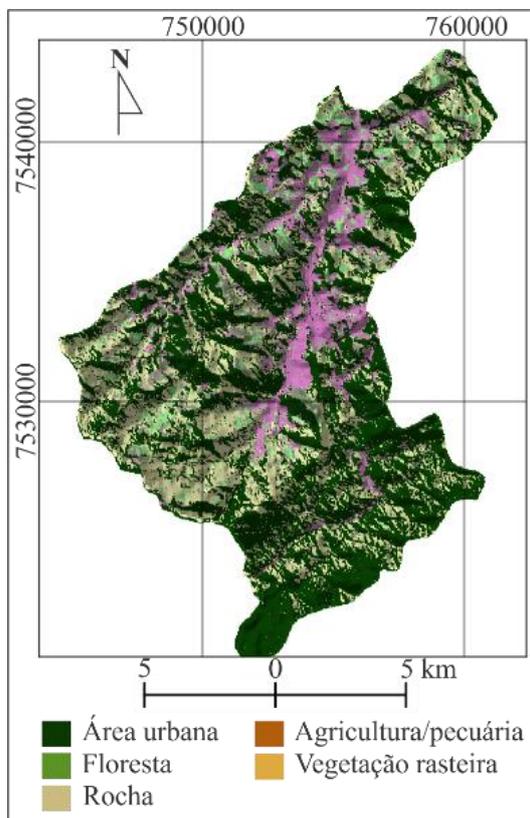
(d)

Figura 2 Camadas utilizadas no processo de modelagem espacial (a) Altitude do terreno (b) Declividade (c) Curvatura vertical (d) TWI (continua)



(e)

(f)



(g)

(h)

Figura 2 Camadas utilizadas no processo de modelagem espacial (e) SPI (f) STI (g) Uso do solo (h) NDVI (continua)

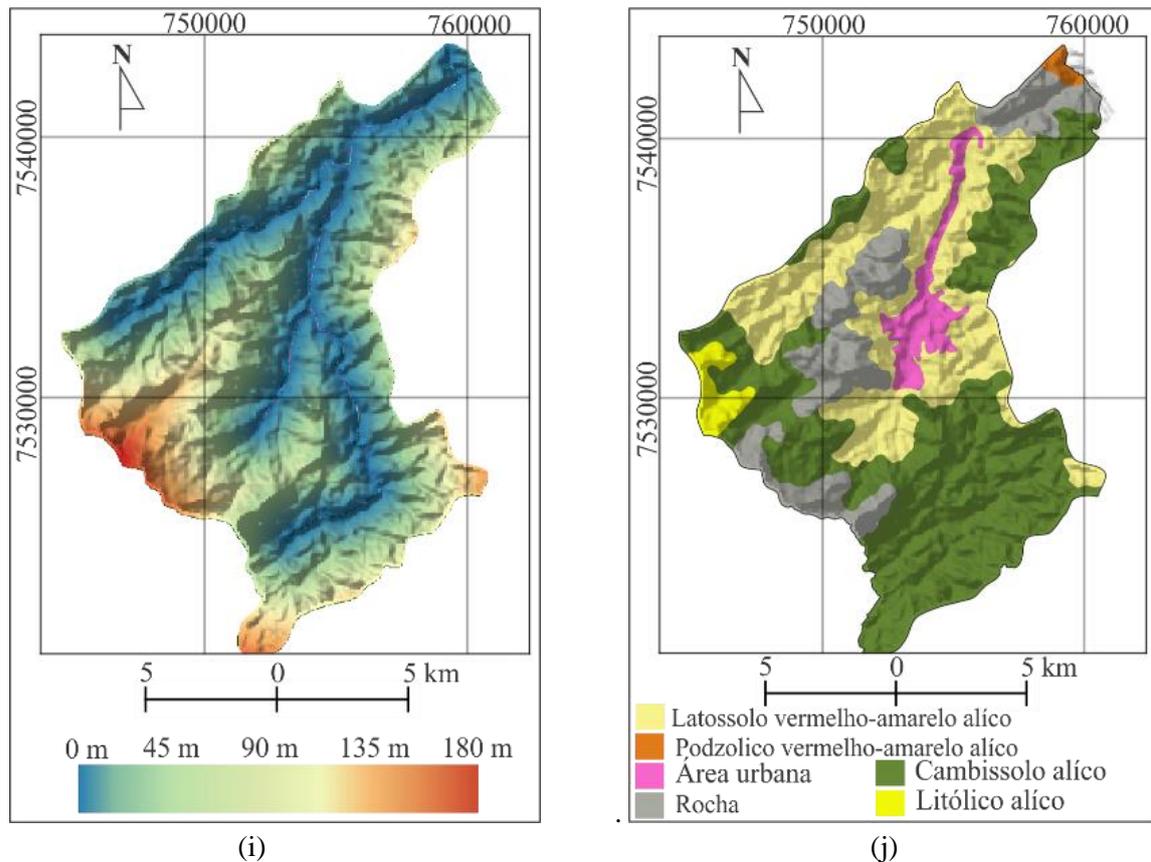


Figura 2 Camadas utilizadas no processo de modelagem espacial (i) Distâncias dos Rios (j) Tipo de solo.

Devido as escalas de aquisição dos dados não serem coincidentes, necessitou-se compatibilizá-las para uma escala menos detalhada. Como não havia informações acerca da escala da camada de tipo de solo, realizou-se a reamostragem de todas as camadas para a escala de 1:100.000. Todos os dados foram referenciados no sistema de coordenadas no Fuso 23 S da Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000). Foram utilizados os softwares gratuitos QGIS 3.3.6, o Geographic

Resources Analysis Support System (GRASS 7.6.1) e o SAGA GIS 3.2.3.

### Método

Nesta Seção é apresentada a metodologia utilizada para a realização do processo de modelagem hidrológica para a identificação de regiões suscetíveis a inundações na Bacia do Rio Bengalas. A metodologia foi dividida em 4 etapas, conforme ilustrado na Figura 3.

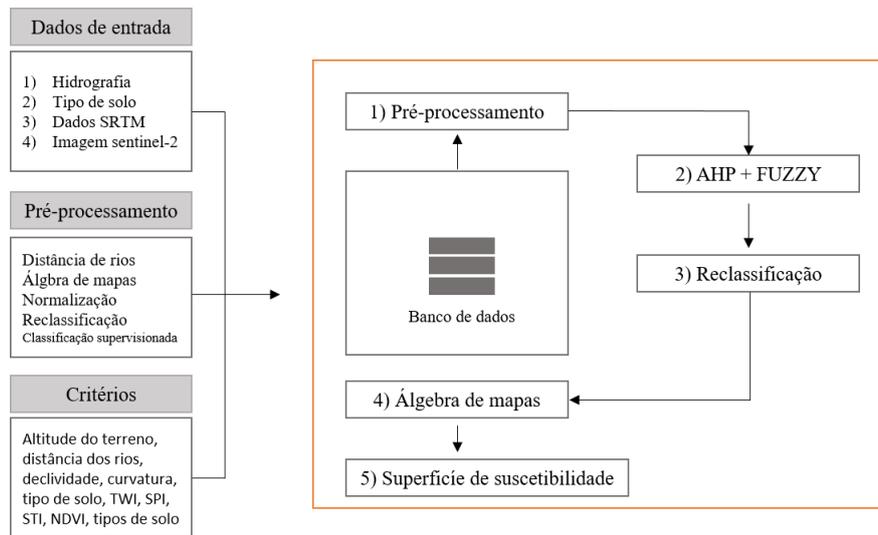


Figura 3 Diagrama metodológico.

A primeira etapa da metodologia proposta foi a realização do pré-processamento das camadas obtidas gratuitamente em plataformas online. Nesta etapa, realizou-se a compatibilização do Sistema de Referência e da Projeção Cartográfica, além dos processos preliminares para a obtenção dos critérios utilizados para a construção do modelo de suscetibilidade a inundações.

Após a construção do banco de dados geográfico, iniciou-se o processo de modelagem Fuzzy-AHP, descrito na Subseção 3.2.1. A partir das ponderações foi realizado o processo de reclassificação dos critérios selecionados para serem utilizados neste trabalho. O modelo final foi construído a partir da soma ponderada (aplicação do processo de álgebra de mapas) de todas as camadas consideradas, conforme apresentado na próximo tópico.

### Modelagem Fuzzy-AHP

Nesta abordagem, organiza-se o problema em uma estrutura hierárquica de decisão, definem-se os critérios e subcritérios e é realizada a análise da influência de cada critério selecionado em relação a áreas de inundações.

No processo de ponderação é necessário a realização de comparações pareadas segundo a concepção de especialistas acerca da problemática a ser modelada, gerando uma matriz quadrada e recíproca, denominada de matriz de comparação (A). Para a realização do processo de ponderação, utilizou-se a escala Fuzzy de importância relativa, como observa-se na Tabela 1.

Tabela 1 Escala Fuzzy de importância relativa

Importância	Escala
Igual	(1,1,1)

Moderadamente maior	(2,3,4)
Fortemente maior	(4,5,6)
Muito fortemente maior	(6,7,8)
Extremamente maior	(9,9,9)
Valores intermediários	(1,2,3) (3,4,5) (5,6,7) (7,8,9)

A partir do julgamento pareado de 3 especialistas, obteve-se os valores de prioridade entre os critérios, identificando aqueles com maior influência no processo de inundações. Para representar os níveis de importância foram aplicados números fuzzy triangulares (M), contabilizando-se os julgamentos de especialistas e aplicando operações aritméticas simples para definir os pontos mínimo (l), intermediário (m) e máximo (u). Um número Fuzzy triangular (M(l, m, u)) é dado pela Equação 5.

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & \text{se } x \in [l, m] \\ \frac{x-u}{m-u} & \text{se } x \in [m, u] \\ 0 & \text{cc} \end{cases} \quad (5)$$

Para a utilização dos números triangulares no método AHP, devem ser realizadas as seguintes operações (Equação 6):

$$\begin{aligned} 1) & M_1(l_1, m_1, u_1) \oplus M_2(l_2, m_2, u_2) \\ 2) & \lambda(l_1, m_1, u_1) = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda u_1) \quad \lambda > 0 \\ 3) & (l_1, m_1, u_1)^{-1} = \left(\frac{1}{u_1}, \frac{1}{m_1}, \frac{1}{l_1}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

Os números Fuzzy triangulares são alocados na matriz A (Equação 7), como segue:

$$A = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \dots & (a_{1j}^1, a_{1j}^m, a_{1j}^r) \\ (a_{12}^1, a_{12}^m, a_{12}^r)^{-1} & (1,1,1) & (a_{2j}^1, a_{2j}^m, a_{2j}^r) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (a_{1i}^1, a_{1i}^m, a_{1i}^r)^{-1} & \dots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Para obtenção dos pesos finais dos critérios *Fuzzy-AHP* foi utilizado o método de média geométrica, conforme Equação 8:

$$\tilde{a}_i = \left( \prod_{j=i}^3 \tilde{a}_{ij} \right)^{1/3} \quad (8)$$

O vetor *W* (Equação 9) representa o resultado do cálculo dos pesos, ou seja, contém o peso de cada critério, finalizando a etapa de ponderação fuzzy AHP.

$$W_i = \frac{\tilde{a}_i}{\sum_{i=1}^3 \tilde{a}_i} \quad (9)$$

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$$

Destaca-se que neste trabalho realizou-se apenas a ponderação dos critérios com o método *Fuzzy-AHP*. Os subcritérios foram ponderados em uma escala de 1 a 10, em que 1 significa baixa influência e 10 significa alta influência na suscetibilidade a inundações.

*Construção do modelo*

O processo de construção do modelo espacial considera uma superfície de suscetibilidade a inundações em formato matricial (*raster*), em que cada célula desta superfície representa um valor de suscetibilidade a inundações de uma determinada posição.

A definição destes valores foi realizada a partir da aplicação do método *Fuzzy AHP* para cada

camada considerada neste trabalho (Quadro 1). Segundo Aissi et al (2012), este processo permite modelar o problema em relação a um conceito particular, em que a aplicação do MAM permite avaliar uma alternativa ( $\theta$ ) em relação a um critério  $g_i$ , sendo denotado por  $g_i(\theta)$ , em que cada camada é representada por um conjunto de células ( $U_i$ ) quantificadas a partir de uma escala ( $\varepsilon_i$ ) de avaliação e associadas a uma superfície ( $m_i$ ), em que  $m_i$  é o conjunto  $\{(s, g_i(s)): s \in U_i\}$ , em que:

$$g : \begin{matrix} U_i \rightarrow \varepsilon_i \\ s \rightarrow g_i(s) \end{matrix} \quad (10)$$

Para unir as diferentes camadas em uma única superfície foi aplicado o processo de álgebra de mapas, que consiste na combinação célula-a-célula de diferentes camadas de dados matriciais, empilhadas uma sobre as outras a partir de uma função matemática.

Como resultado da aplicação deste processo é a definição de uma superfície de suscetibilidade a inundações, em que cada célula apresenta um valor de risco para ocorrências de inundações (Quando maior o valor associado a célula, maior a suscetibilidade).

**Resultados e discussão**

Neste trabalho, foram selecionados 10 critérios para a construção de um modelo espacial de suscetibilidade a inundações para a Bacia do Rio Bengalas (Tabela 2), incluindo parâmetros geomorfológicos, hidrológicos e de uso e ocupação do solo. Todos os dados foram integrados utilizando ferramentas presentes em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para a geração do modelo espacial de suscetibilidade a inundações.

Tabla 2 Matriz de comparação com números triangulares (C1 –altitude, C2 – declividade, C3 – uso do solo, C4 – distância dos rios, C5 – tipo de solo, C6 – NDVI, C7 – Curvatura, C8 – TWI, C9 – STI e C10 – SPI.

/	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	(1,1,1)	(4,5,6)	(5,6,7)	(2,3,4)	(7,8,9)	(5,6,7)	(2,3,4)	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	(1,1,1)	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )
C2	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	(1,1,1)	(2,3,4)	(2,3,4)	(4,5,6)	(2,3,4)	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )
C3	( $\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	(1,1,1)	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	(1,2,3)	( $\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}$ )	( $\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$ )	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )
C4	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	(4,5,6)	(1,1,1)	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$ )
C5	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{1}$ )	(4,5,6)	(1,1,1)	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}$ )	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}$ )	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9}$ )
C6	( $\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	(3,4,5)	(2,3,4)	(2,3,4)	(1,1,1)	( $\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}$ )	( $\frac{1}{8}, \frac{1}{7}, \frac{1}{6}$ )	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{9}, \frac{1}{8}, \frac{1}{7}$ )
C7	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	(2,3,4)	(4,5,6)	(2,3,4)	(4,5,6)	(3,4,5)	(1,1,1)	( $\frac{1}{6}, \frac{1}{5}, \frac{1}{4}$ )	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	( $\frac{1}{7}, \frac{1}{6}, \frac{1}{5}$ )
C8	(4,5,6)	(6,7,8)	(9,9,9)	(6,7,8)	(7,8,9)	(6,7,8)	(4,5,6)	(1,1,1)	(2,3,4)	( $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{1}$ )
C9	(1,1,1)	(4,5,6)	(5,6,7)	(4,5,6)	(6,7,8)	(4,5,6)	(2,3,4)	( $\frac{1}{4}, \frac{1}{3}, \frac{1}{2}$ )	(1,1,1)	( $\frac{1}{5}, \frac{1}{4}, \frac{1}{3}$ )

C10	(6,7,8)	(6,7,8)	(6,7,8)	(5,6,7)	(9,9,9)	(7,8,9)	(5,6,7)	(1,2,3)	(3,4,5)	(1,1,1)
-----	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

A influência de cada critério foi definida a partir das comparações pareadas entre as 10 classes, realizada a partir da consulta a três especialistas. Com base nestas opiniões o método *Fuzzy* AHP foi implementado em uma tabela eletrônica para possibilitar a computação dos pesos de cada classe selecionada; e compor o modelo de suscetibilidade a inundação da Bacia do Rio Bengalas.

Pode-se observar que para cada processo de comparação pareada foi realizada a determinação de um número triangular *fuzzy* seguindo a escala de importância relativa *Fuzzy*, conforme exemplificada na Tabela 1. A partir da matriz de comparação (Tabela 2), computou-se a média geométrica para o número *fuzzy* triangular ( $l_i, m_i, u_i$ ), bem como as ponderações relativas para cada critério selecionado (Tabela 3).

Observa-se que os parâmetros geomorfológicos (C10, C9 e C8) receberam as

maiores ponderações, isso é justificado devido a influência direta destes critérios no processo de escoamento superficial da água, bem como do processo de infiltração. El-Magd, Amer e Embaby (2020) em seu estudo de suscetibilidade a inundações em Sohag no Egito, identificaram também a forte correlação entre fatores geomorfológicos e suscetibilidade a inundações. Ademais, segundo Pham et al (2020) elementos como a distância dos rios que compõem a bacia, o relevo da região, declividade e o uso e ocupação do solo são elementos essenciais no processo de modelagem de suscetibilidade a inundações. Na Tabela 3 é possível observar a ponderação de todos os critérios empregados.

As ponderações relacionadas a cada critério foram multiplicadas pelos valores destinados a cada subcritério, obtendo os valores de ponderação final para cada elemento que será utilizado no processo de criação do modelo.

Tabela 3 Ponderações *Fuzzy* - AHP

Critérios	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Pesos	11,24	4,38	1,75	2,42	2,05	3,34	7,07	25,00	12,93	30,00

Os valores foram convertidos para uma escala de 1 a 100 para facilitar o processo de reclassificação das camadas. O resultado do

processo de ponderação é apresentado na Tabela 4. A influência de cada subcritério é ilustrada no Figura 4 como segue. .

Tabela 4 Resultados dos processos de ponderação

Critério	Peso	Subcritério	Peso	Critério	Peso	Subcritério	Peso
C1	11,24	623,00 - 823,00 m	7	C6	3,34	0 - 0,09	8
		823,01-1023,00 m	5			0,10 - 0,36	6
		1023,01-1223,00 m	4			0,37-0,62	4
		1223,01-1423,00 m	3			<0,62	2
		1423,01-1623,00 m	2	C7	7,07	Convexo	1
		1623,01-1823,00 m	1			Côncavo	9
		1823,01-2023,00 m	1			Plano	3
		2023,01-2230,00 m	1				
C2	4,28	Plano	10	C8	25,00	0,00-1,00	1
		Suave Ondulado	7			1,01-5,00	2
		Ondulado	5			5,01-9,00	4
		Forte Ondulado	3			9,01-10,00	6
		Montanhoso	2			10,01-14,00	9
		Escarpado	1			14,01-20,00	10
C3	1,75	Área urbana	8	C9	12,93	0,00-10,99	10
		Floresta	1			11,00-99,99	8
		Rocha	8			100,00-199,99	5
		Agricultura	6			200,00-499,99	2
						< 500,00	1

		Vegetação rasteira	5	C10	30,0 0	0 -10,99	10
C4	2,42	0 -20 m	9			11,00-99,99	8
		20,01 – 40,00 m	5			100,00-199,99	6
		40,01 – 60,00 m	3			200,00-499,99	2
		60, 01 – 90, 00 m	2			<500	1
		≤90, 01	1				
C5	2,05	Lat. Vermelho amarelo Alíco	3				
		Podzólico Vermelho amarelo Alíco	6				
		Área Urbana	8				
		Rocha	8				
		Cambissolo Alíco	6				
		Litólico Alítico	5				

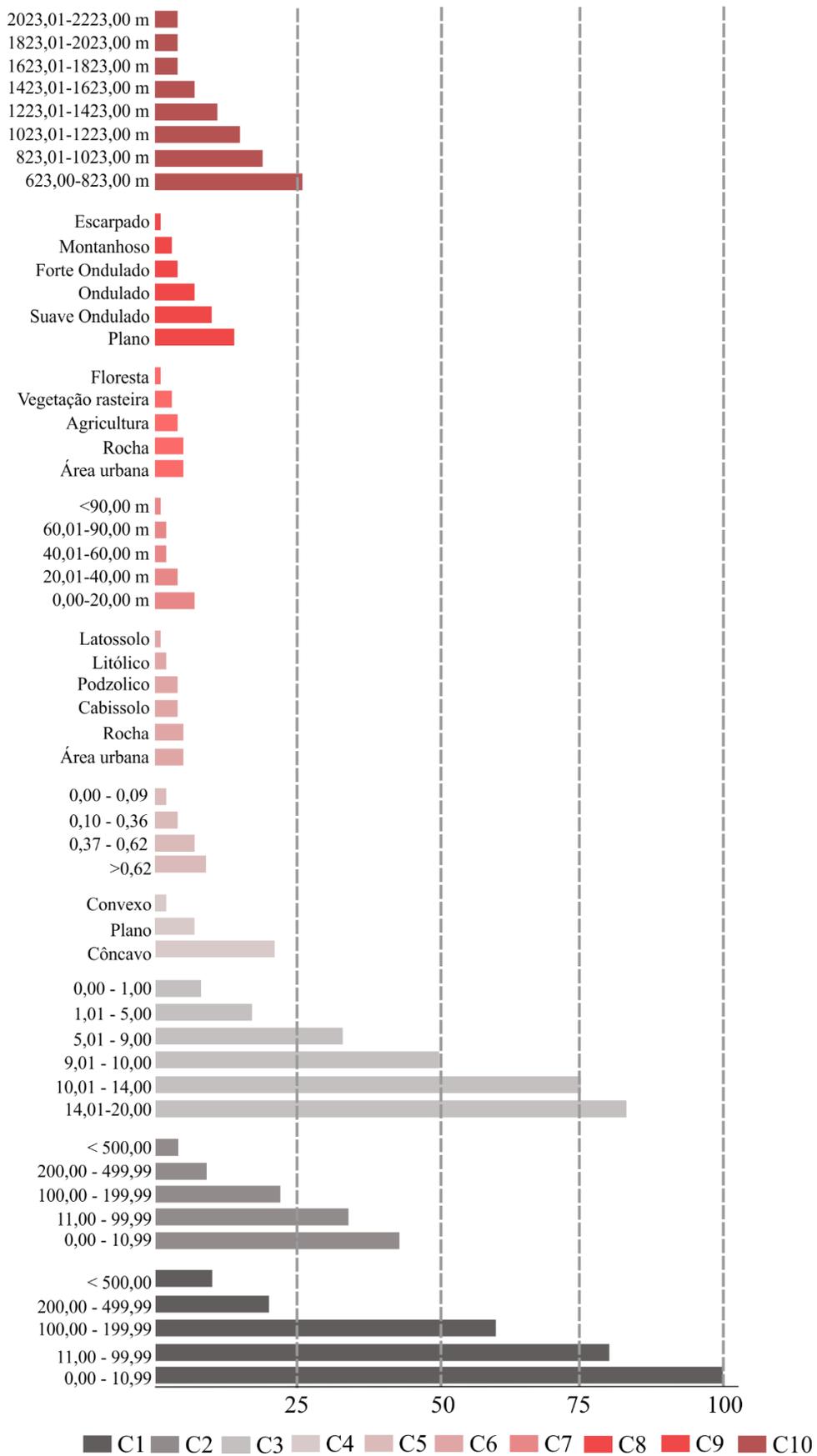


Figura 4 Pesos atribuídos aos Subcritérios (Comparação)

A partir da ferramenta de reclassificação de raster do software QGIS 3.3.6, cada camada foi reclassificada de acordo com as ponderações

atribuídas (Tabela 4). O resultado deste processo é ilustrado na Figura 4.

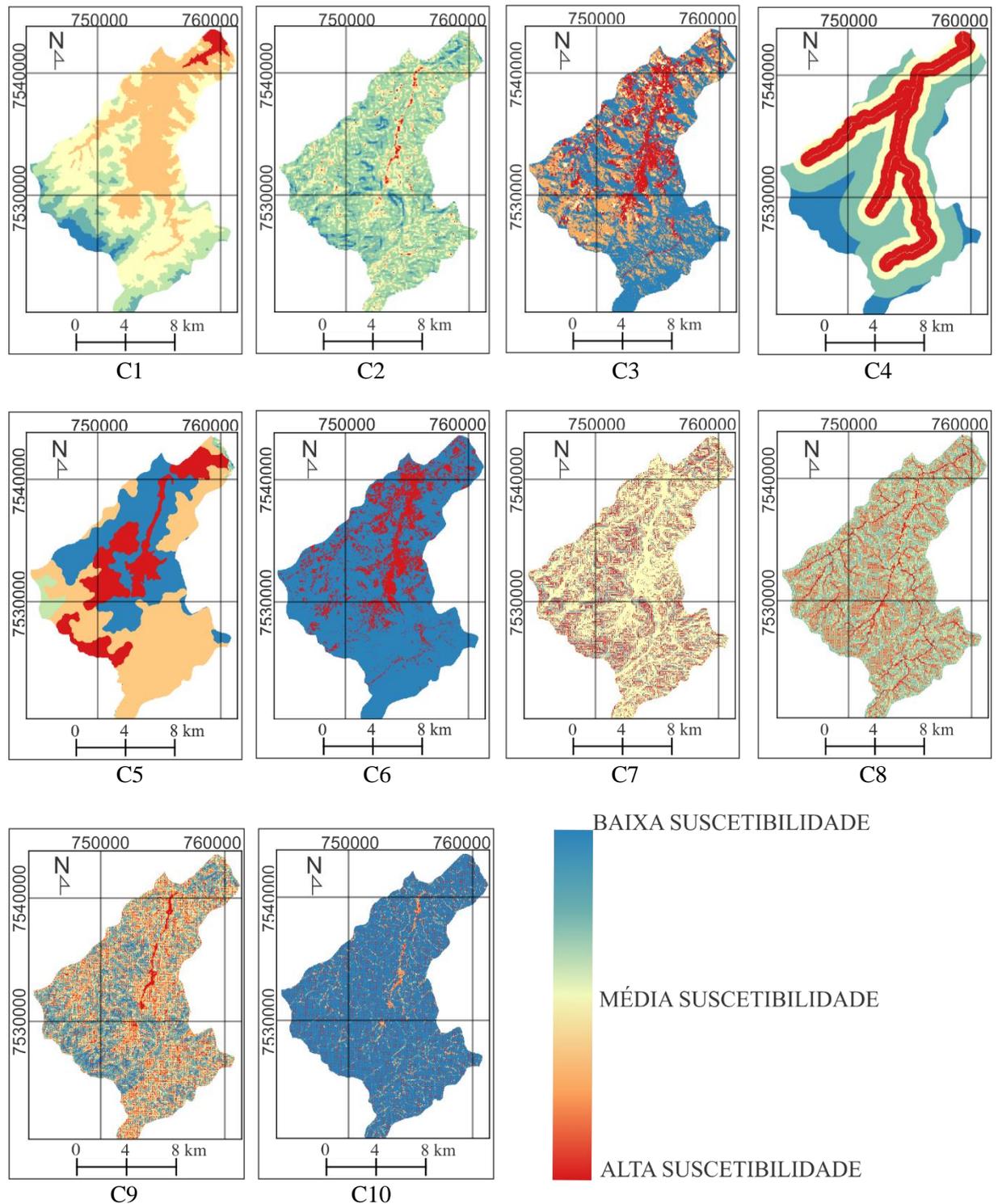


Figura 4 Camadas reclassificadas a partir das ponderações *Fuzzy-AHP*.

Realizando uma análise visual das camadas apresentadas na Figura 4, pode-se observar que as regiões que apresentaram as maiores taxas de suscetibilidade a inundações são aquelas próximas aos rios e córregos, e áreas em que o índice de impermeabilização do solo (região urbana) é alto, o que valida a consistência das ponderações

A partir das camadas classificadas, realizou-se o processo de álgebra de mapas utilizando o software GRASS 7.6.1. Esta atividade

consistiu na aplicação da ferramenta calculadora raster para a realização da soma ponderada das camadas utilizadas no processo de modelagem espacial multicritério (Figura 5).

Na Figura 5, observa-se que as regiões próximas aos rios e córregos são a áreas que apresentam a maior suscetibilidade a inundações na Bacia do Rio Bengalas. Destaca-se ainda, que esta região é a que apresenta a maior taxa populacional do município de Nova Friburgo, o que acarreta em problemas sociais.

Semelhante a este trabalho, Miranda et al (2019) empregaram o método AHP para a definição de áreas suscetíveis a inundações na Bacia hidrográfica mista de Cuiabá (MT). Os autores adotaram dados geográficos como: declividade, altimetria, geologia e uso do solo para construir um modelo espacial da região. Segundo os autores, aplicar o método de análise multicritério associado ao SIG é de fácil implementação e aplicação, todavia a baixa quantidade de dados disponíveis e em escalas inadequadas de aquisição prejudicam os resultados.

Além de trabalhos relacionados a inundações, encontram-se diversas propostas que utilizam a modelagem espacial associada a métodos de análise multicritério, apresentando resultados coerentes. No trabalho de Freiman e Santos (2020), foi empregado juntamente com as ferramentas do SIG o método AHP para a definição de diretrizes preferenciais de linhas de transmissão

de energia elétrica, encontrando resultados satisfatórios quando comparado com traçados realizados a partir de métodos tradicionais. Todavia, nos resultados, segundo autores, são inseridas informações tendenciosas devido as experiências e vivências dos analistas que realizaram as ponderações (problema de subjetividade).

Pilevar et al. (2019) utilizaram (para minimização da subjetividade) o método AHP associado a Lógica *Fuzzy* para identificação de áreas adequadas para o plantio de trigo e milho em regiões semiáridas. A utilização da técnica permitiu a realização de estudos da paisagem da região e auxiliou no processo de planejamento espacial da produção agrícola e o gerenciamento de riscos associados ao plantio. A aplicação de um modelo híbrido, conforme apresentado neste trabalho, minimizou a subjetividade do método AHP.

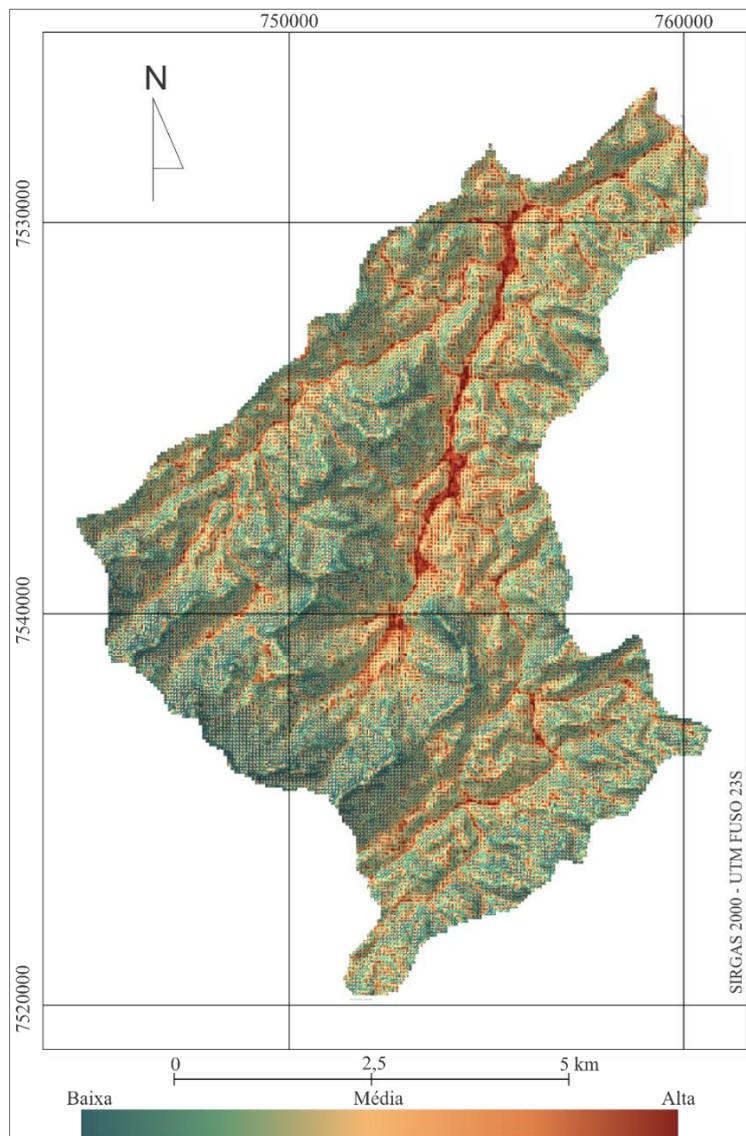


Figura 5 Mapa de suscetibilidade a inundações.

Outras propostas, além da utilização de modelos multicritérios híbridos, buscam empregar processos para identificar espacialmente áreas suscetíveis a inundações. Bui et al. (2020) e Dodangeh et al. (2020) propuseram a utilização de algoritmos de inteligência artificial para realização desta tarefa. Observa-se que neste caso a subjetividade do processo de ponderação é eliminado, porém deve-se conhecer as ocorrências de inundações (previamente) da região de estudo para que se possa especializar e modelar adequadamente os eventos. Os resultados apresentados em ambos os trabalhos foram satisfatórios na identificação de regiões suscetíveis a inundações.

Neste trabalho, a partir de uma análise histórica de ocorrências de inundações na Bacia do Rio Bengalas e comparando-as com o modelo gerado (Figura 5), identificou-se que o modelo construído a partir do processo de ponderação com o método híbrido multicritério *Fuzzy-AHP* é consistente.

Na Figura 6 são apresentadas as regiões com incidências históricas de inundações na Bacia do Rio Bengalas. Observa-se que as regiões que apresentaram ocorrências de inundações são coincidentes com o mapa de suscetibilidade gerado neste trabalho com a utilização do MAM *Fuzzy-AHP*, demonstrando que a metodologia utilizada pode ser aplicada para a análise de outras regiões que se tenha a necessidade.

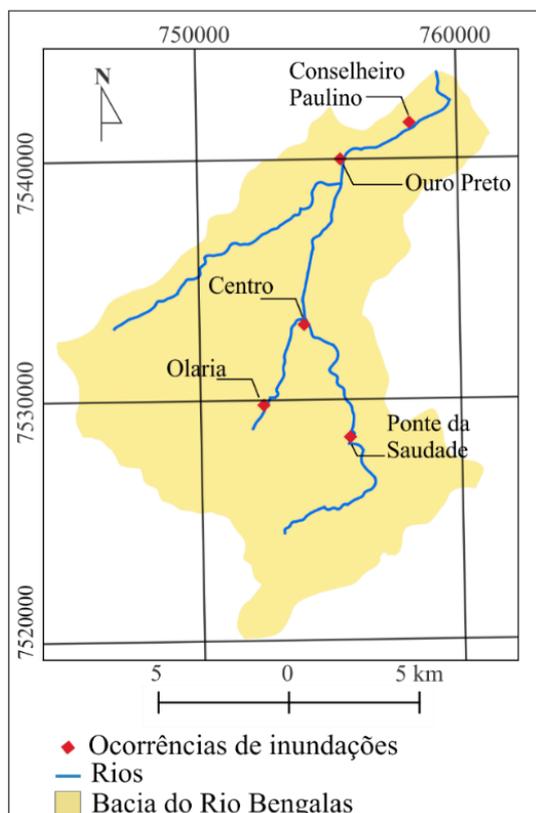


Figura 6 Ocorrências de inundações.

Freiman, F. P.; Carvalho, C. O.

## Conclusões e Recomendações

Este trabalho descreveu e testou a combinação entre as ferramentas SIG e o método de análise multicritério híbrido, formado a partir da combinação entre a inferência *Fuzzy* e o AHP para a avaliação da suscetibilidade a inundações. Utilizou-se a bacia do Rio Bengalas, localizada na Região Serrana do Rio de Janeiro como área para testar a metodologia descrita neste trabalho.

A vantagem da utilização da inferências *Fuzzy* com o método AHP é a possibilidade de unificar a possibilidade de manusear e modelar informações imprecisas (a partir da inferência *Fuzzy*) em uma hierarquia de preferências (com a aplicação do método AHP), minimizando as incertezas do processo de ponderação.

Os resultados obtidos com a modelagem proposta demonstram que: 1) A aplicação do método *Fuzzy-AHP* permite a identificação de áreas suscetíveis a inundações a partir da consulta a especialistas com precisão suficiente para a identificação de áreas críticas; 2) O método pode ser aplicado a qualquer localidade, utilizando informações geográficas e softwares SIG gratuitos, sem a necessidade de realização de visitas a campo e aquisição de dados *in loco*; e 3) As autoridades locais podem utilizar do processo de modelagem espacial multicritério para a definição de áreas prioritárias para o recebimento de políticas públicas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a consulta a um número maior de especialistas para aumentar a precisão das ponderações e minimização da subjetividade do método. Além disso, o processo aplicado neste trabalho foi realizado de forma manual, recomendando-se a realização da automatização do processo para minimização do tempo de processamento e obtenção do modelo final. Como desvantagem da metodologia, destaca-se que cada região apresentará características únicas e que devem ser analisadas isoladamente no processo de ponderação.

## Referências

Aissi, H.; et al. 2012. GIS-Based Multicriteria Evaluation Approach for Corridor Siting. *Environment And Planning B: Planning and Design*, [s.l.], v. 39, n287-307, abr. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1068/b37085>. Acesso em: 23 mar. 2020.

Bui, D. T. et al. 2020. A novel deep learning neural network approach for predicting flash flood

- susceptibility: A case study at a high frequency tropical storm area. *Science Of The Total Environment*, [s.l.], v. 701, 134413-134422., Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134413> Acesso em: 24 mar. 2020.
- Beven, K. J.; Kirkby, M. J. 1979. A physically based variable contributing areamodel of basin hydrology. *Hydrology Science*, Wallingford, v. 24, 43-69, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>. Acesso em: 23 mar. 2020.
- Chang D.Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP, *European Journal of Operation Research*, Volume 95, Number 3, Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(95\)00300-2](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(95)00300-2). Acesso em: 23 mar. 2020.
- CRED, UNISDR, 2015. The human cost of weather related disasters 1995-2015. Crosetto, M., Tarantola, S., 2001. Uncertainty and sensitivity analysis: tools for GISbased model implementation.
- Dodangeh, E. et al. 2020. Integrated machine learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. *Science Of The Total Environment*, [s.l.], v. 705, 135983-135993, fev. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135983>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- El-Magd, S. A. A.; Amer, R. A.; Embaby, A. 2020. Multi-criteria decision-making for the analysis of flash floods: A case study of Awlad Toq-Sherq, Southeast Sohag, Egypt. *Journal Of African Earth Sciences*, [s.l.], v. 162, 103709-103718, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103709>. Acesso em: 25 mar. 2020.
- EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1979. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 83p.
- Freiman, F. P.; Santos, D.R. dos. 2019. Planejamento do Traçado de Diretrizes de Linha de Transmissão de Energia Elétrica Baseado em Otimização Multicritério e SIG. *Revista Brasileira de Cartografia*, [s.l.], v. 71, 878-905, 25 set. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv71n3-46892>. Acesso em: 10 fev. 2020.
- Jakeman, A. J. et al. *Environmental Modelling, Software and Decision Support: State of the art and new perspective*. Elsevier, 2008.
- Kanani-sadat, Yousef et al. 2019. A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS-based hybrid multi criteria decision-making method. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 572, 17-31, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- Kazakis, N.; Kougias, I.; Patsialis, T. 2015. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope-Evros region, Greece. *Science Of The Total Environment*, [s.l.], v. 538, 555-563, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055> Acesso em: 20 mar. 2020.
- Koriche, S. A.; Rientjes, T. 2016. Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. *Physics And Chemistry Of The Earth, Parts A/b/c*, [s.l.], v. 93, 12-23, jun.. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.007>. Acesso em: 20 de março 2020.
- Khosravi, K. et al. 2019. A comparative assessment of flood susceptibility modeling using Multi-Criteria Decision-Making Analysis and Machine Learning Methods. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 573, p.311-323, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073> Acesso em: 20 mar. 2020.
- Kia, M.B., et al. 2012. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia. *Environ. Earth Sci.* v. 67, 251-264.
- Malczewski, J. 2006. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal Of Geographical Information Science*, [s.l.], v. 20, 703-726, ago. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13658810600661508>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- Meyer, V.; Scheuer, S.; Haase, D. 2008. A multicriteria approach for flood risk mapping

exemplified at the Mulde river, Germany. *Natural Hazards*, [s.l.], v. 48, 17-39.

- Miranda, N. M. G. et al. 2019. Hierarchical Analytical Process (AHP) in Spatial Modeling of Flood Vulnerability in Mixed Environments. *Anuário do Instituto de Geociências - Ufrj*, [s.l.], v. 42, n. 4, p.172-181, 12 dez. Instituto de Geociências - UFRJ. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_4\\_172\\_181](http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_172_181). Acesso em: 24 mar. 2020
- Mousavi, S. M.; Roostaei, S.; Rostamzadeh, Hashem. 2019. Estimation of flood land use/land cover mapping by regional modelling of flood hazard at sub-basin level case study: Marand basin. *Geomatics, Natural Hazards And Risk*, [s.l.], v. 10, 1155-1175, Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1549112>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Ouma, Y.; Tateishi, R. 2014. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *Water*, [s.l.], v. 6, 1515-1545, Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w6061515>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Papaioannou, G.; Vasiliades, L.; Loukas, A. 2014. Multi-Criteria Analysis Framework for Potential Flood Prone Areas Mapping. *Water Resources Management*, [s.l.], v. 29, 399-418.
- Phan, B. T. et al. 2020. GIS Based Hybrid Computational Approaches for Flash Flood Susceptibility Assessment. *Water*, [s.l.], v. 12, 683-712, 2 mar. MDPI AG. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/w12030683>. Acesso em: 20 mar. 2020.
- Saaty, T. L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, NY.
- Tang, Z. et al. 2018. Assessment of flood susceptible areas using spatially explicit, probabilistic multi-criteria decision analysis. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 558, p.144-158,. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.033>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Tehrany, M. S.; Pradhan, B.; Jebur, M. N. 2013. Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 504, p.69-79, nov. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.034>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Tehrany, M. S; Pradhan, B.; Jebur, M. N.. 2014. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal Of Hydrology*, [s.l.], v. 512, 332-343, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>. Acesso em: 10 mar. 2020.
- Valeriano, M. M., Carvalho, J. O. A. 2003. Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [s.l.], n. 1, p. 17-29.
- Wang, Y. et al. 2011. A GIS-Based Spatial Multi-Criteria Approach for Flood Risk Assessment in the Dongting Lake Region, Hunan, Central China. *Water Resources Management*, [s.l.], 25, 3465-3484.
- Wilson, J. P.; Gallant, J. C. 2000. Digital Terrain Analysis. In: Wilson, J. P.; Gallant, J. C. Eds., *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley and Sons, Inc, New York, , pp. 1-27.
- Zhang, D. et al. 2015. Flash flood hazard mapping: A pilot case study in Xiapu River Basin, China. *Water Science And Engineering*, [s.l.], v. 8, 195-204, Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2015.05.002>. Acesso em: 20 mar. 2020.