

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO UTILIZANDO O MÉTODO DA RAZÃO DE FREQUÊNCIA APLICADO À BACIA DO RIACHO FUNDO - DISTRITO FEDERAL

FLOOD SUSCEPTIBILITY MAPPING USING THE FREQUENCY RATIO METHOD APPLIED TO THE RIACHO FUNDO BASIN - FEDERAL DISTRICT

Hugo Leonardo Oliveira Chaves, Maria Elisa Leite Costa, Sérgio Koide, Tati de Almeida, Rejane Ennes Cicerelli

Universidade de Brasília

eng.hugochaves@gmail.com, mariaelisaleitecosta@hotmail.com, skoide@unb.br, tati_almeida@unb.br, rejaneig@unb.br

Submissão: 11 de dezembro de 2020 Aceitação: 23 de março de 2021

Resumo

O mapeamento de suscetibilidade à inundação é importante para o manejo da dinâmica do uso do solo e, conseqüentemente, da hidrologia urbana local. O presente estudo produziu o mapa de suscetibilidade à inundação na Bacia do Riacho Fundo, Distrito Federal, utilizando o método estatístico bivariado Razão de Frequência (*Frequency Ratio*), com 30 pontos de inundação observados em 2018 como pontos de treinamento (71%) e outros 12 pontos de inundação (29%) como pontos de validação para desenvolvimento do modelo. O modelo é composto de 12 fatores de influência: declividade, curvatura, aspecto, hipsometria, distância dos rios, índice de potência de escoamento, índice de transporte de sedimento, índice topográfico de umidade, índice de rugosidade do terreno, índice de escoamento superficial, uso e cobertura do solo e geologia. Todas as variáveis com um tamanho de pixel de 12,5 m x 12,5 m. Os fatores de uso e cobertura do solo e geologia local mostraram-se os mais influentes no modelo. A validação do modelo foi realizada utilizando o método da área sob a curva, com uma acurácia de 85,75%. O estudo mostra que o método pode ser usado para auxiliar no estudo de planos de controle e mitigação de inundação em centros urbanos, como a locação preliminar de bacias de detenção.

Palavras-chave: suscetibilidade, inundação, mapeamento, razão de frequência, geoprocessamento.

Abstract

Flood susceptibility mapping is important to the management of the urban hydrological dynamic and to the studies conducted to prevent the flood-based problems. This study has produced a flood susceptibility map using a bivariate statistical analysis named frequency ratio (FR) model applied in the Riacho Fundo catchment, with 30 flooding locations (71%) for statistical analysis as training dataset and 12 remaining points (29%) were applied to validate the developed model. Twelve conditioning factors were considered in this study: slope, curvature, aspect, elevation, distance to river, stream power index (SPI), sediment transport index (STI), topographic wetness index (TWI), terrain roughness index (TRI), superficial runoff index, land use/land cover (LULC) and geology. All these variables were resampled into 12.5x12.5 m pixel size. The model showed LULC and geology as the most influential factors in flooding. The AUC for success rate was 85.75% with the training points. The study shows the method can be used in studies of plans to mitigate and control flooding in urban centers, as preliminary lease of ponds.

Keywords: susceptibility, flooding, mapping, frequency ratio, geoprocessing.

INTRODUÇÃO

Inundações e enchentes são ameaças naturais devastadoras que podem causar danos às infraestruturas e à sociedade (SAMANTA *et*

al., 2018). Identificar áreas suscetíveis à inundação é uma tarefa importante para o estudo e prevenção das conseqüências desse fenômeno (ALI *et al.*, 2020). Segundo Tehrany *et al.* (2018), inundações são resultado da forte chuva em um

curto espaço de tempo, em locais onde há impermeabilização de uma grande área, geralmente causada pela urbanização, provocando a cheia de rios e encobrendo regiões adjacentes. Enchentes e inundações são consideradas os tipos de desastres naturais mais comuns e os que geram maiores prejuízos, em termos econômicos e humanos, sendo responsáveis por cerca de 31% do total de danos à economia provenientes de eventos naturais catastróficos (YALCIN; ARYUREK 2004; DANO *et al.*, 2019). Desta forma, é fundamental erradicar ou minimizar os possíveis danos causados pelas inundações, e uma ferramenta inicial é o mapeamento das áreas suscetíveis, pois com ele é possível planejar a locação de estruturas de engenharia.

Os modelos mais utilizados para modelagem de suscetibilidade à inundações são os seguintes: método da Razão Frequência (FR), Rede Artificial Neural (ANN), Processo Hierárquico Analítico (AHP), Lógica Fuzzy, Lógica de Regressão e Peso de Evidência (WoE) (SAMANTA *et al.*, 2018). O Processo Hierárquico Analítico e a Lógica Fuzzy são as principais técnicas qualitativas mais comumente usadas em avaliação de suscetibilidade à inundações (RAHMATI *et al.*, 2016), enquanto métodos como a Razão de Frequência (FR), o Peso da Evidência (WoE) e a Regressão Logística (LR) são mais utilizados como métodos quantitativos (BUI *et al.*, 2019).

O método da Razão de Frequência consiste em uma análise estatística bivariada (BSA) de cada classe de fatores que influenciam no fenômeno da inundações em relação às suas áreas de ocorrência (TEHRANY *et al.*, 2015). Tal método foi proposto por Tehrany *et al.* (2014) para áreas com alto índice de urbanização e declividade moderada, condições semelhantes às da região deste estudo, qual seja, a Região Administrativa de Vicente Pires, localizada na Bacia do Riacho Fundo.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo o mapeamento das áreas suscetíveis à inundações na Bacia do Riacho Fundo (Distrito Federal), a fim de apoiar políticas públicas de mitigação, tais como construções de bacias de retenção.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo escolhida é a unidade hidrográfica do Riacho Fundo, localizada dentro da bacia hidrográfica do Lago Paranoá, Distrito Federal. Essa unidade hidrográfica possui uma área de 217 km², o que corresponde a aproximadamente 75% da área da bacia do Lago Paranoá, que tem área de 288,69 km² (SEMARH, 1999). A unidade hidrográfica do Riacho Fundo (Figura 1) tem como principais cursos d'água os córregos Vicente Pires e Guará, os quais são afluentes do córrego Riacho Fundo, sendo este o responsável pelo abastecimento do Lago Paranoá, corpo hídrico de grande importância social e ecológica na região de Brasília (NETO *et al.*, 2017).

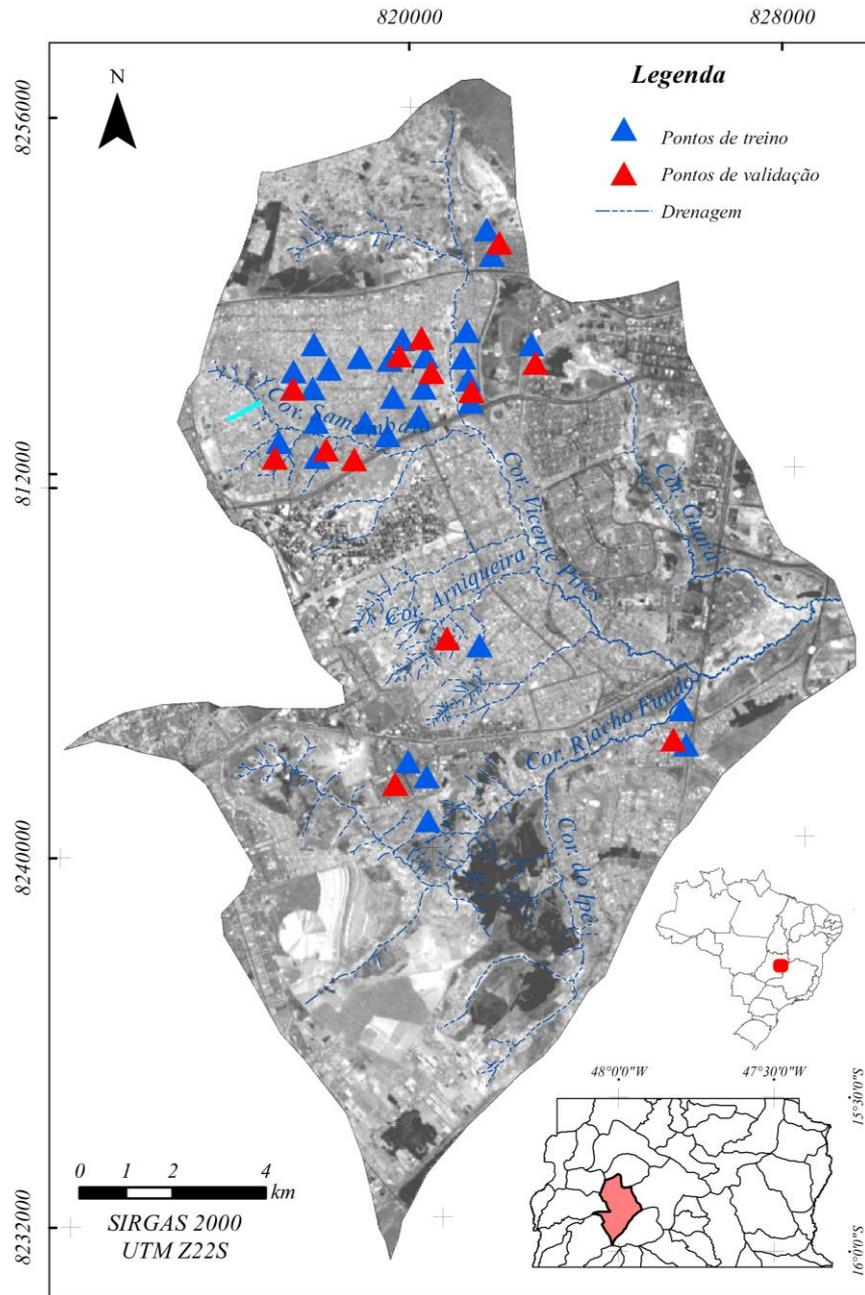
A bacia pode ser dividida em função de seus dois principais córregos, o Riacho Fundo e o Vicente Pires. As áreas adjacentes ao córrego Vicente Pires são mais urbanizadas e as do córrego Riacho Fundo mais rurais, sendo observadas, no entanto, expansões urbanas em suas cabeceiras, representadas por condomínios residenciais de baixa renda (AQUINO *et al.*, 2018).

A Região Administrativa do Vicente Pires no Distrito Federal é marcada por ocorrências de inundações devido à desordenada e rápida urbanização da área (DE PAULA *et al.*, 2017; CEOLIN *et al.*, 2019). Segundo o Governo do Distrito Federal (GDF), até 2019, foram construídas 11 bacias de retenção e o planejamento previu a construção de mais 22, até o final de 2020 (AGÊNCIA BRASÍLIA, 2019). Essas estruturas de engenharia são utilizadas com o objetivo de captar e descarregar as águas precipitadas e escoadas nos córregos locais com vazões menores, provocando o amortecimento das vazões (HIPÓLITO *et al.*, 2019). As águas afluentes das bacias são descarregadas no Córrego Vicente Pires, por meio de dissipadores de energia, a fim de evitar a erosão do solo e o surgimento de voçorocas.

Dados Espaciais e Programas Utilizados

Os softwares utilizados para o processamento das informações desta pesquisa foram o ArcGIS® versão 10.6.1 com a extensão HEC-GEO HMS, para obtenção do escoamento superficial pelo método SCS-Curva Número, e o *Hydrology National Engineering Handbook*, para a obtenção da tabela de curva número do solo. Os dados vetoriais utilizados e suas respectivas fontes encontram-se listados no Quadro 1.

Figura 1. Mapa de localização da bacia do Riacho Fundo (Brasília – DF) com os pontos de inundação da Bacia do Riacho Fundo (DF) obtidos e utilizados para modelo (pontos de treinamento) e de validação.



Fonte: Geoportal/ GDF (<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/>)

Inventário das áreas de inundação

O inventário das áreas de inundação é essencial para o estudo da correlação entre as ocorrências de inundação e os diferentes fatores de influência (KHOSRAVI *et al.*, 2016). Os pontos que representam as áreas com histórico de inundação são divididos em dois grupos: um grupo para o treinamento e desenvolvimento do modelo e outro para o processo de validação. Os

dados de treinamento auxiliam na atribuição do peso a cada um dos fatores de influência, enquanto os pontos de validação são utilizados para avaliar a acurácia e precisão do modelo (PRADHAN *et al.*, 2014, CANIANI *et al.*, 2008; TEHRANY *et al.*, 2015b). Todavia, não há instrução que defina como os dados devem ser divididos nesses dois grupos (PRADHAN; LEE, 2010). Neste trabalho, foram definidos,

aleatoriamente, 30 pontos de treinamento e 12 pontos de validação do modelo (Figura 1). Todos os fatores matriciais foram redimensionados para

uma resolução espacial de 12,5 m e escala de 1:100.000 para dados vetoriais.

Quadro 1: Dados vetoriais utilizados e suas respectivas fontes de consulta

Dados	Fonte	Endereço
Áreas históricas com de inundação	Geoportal GDF	https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/
Mapa de solos	Zoneamento Ecológico-econômico/ GDF	http://www.zee.df.gov.br/
Geologia	Campos <i>et al.</i> (2013)	
Precipitação mensal	CAESB	https://atlas.caesb.df.gov.br/hidrometeorologia/
Curvas de nível – Equidistância de 5 metros	Geoportal GDF	https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/
Hidrografia de (1:100000)	Geoportal GDF	https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/
Uso e cobertura do solo de 2018 (1:100.000)	Mapbiomas	https://mapbiomas.org/

Fonte: Os Autores.

Fatores de influência

Os fatores de influência em inundação urbana são diversos e cada um tem uma contribuição particular para o evento (RAHMATI *et al.*, 2015). A modelagem de suscetibilidade à inundação conta com uma seleção apropriada dos fatores de influência na região de estudo para a obtenção de um modelo confiável, pois um fator pode ser muito influente em uma bacia específica, mas não ter a mesma influência em outras áreas (KIA *et al.*, 2012).

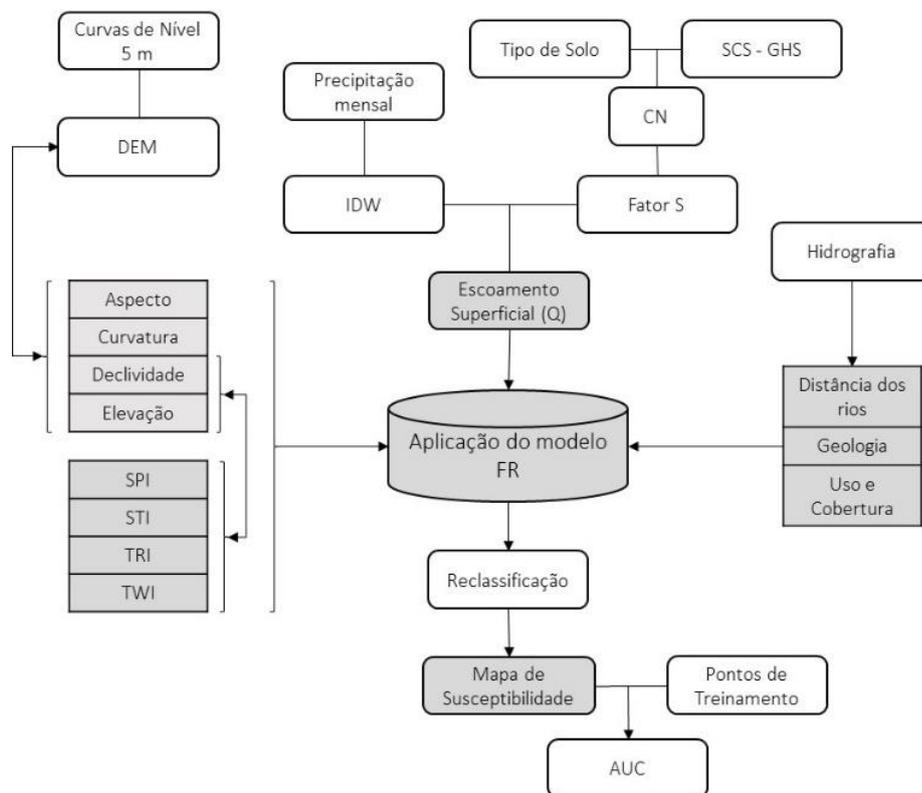
Foram selecionados os fatores: declividade, curvatura, aspecto, hipsometria, distância dos rios, índice de potência de escoamento (*Stream Power Index – SPI*), índice de transporte de sedimento (*Sediment Transport Index – STI*), índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index – TWI*), índice de rugosidade do terreno (*Terrain Roughness Index – TRI*), índice de escoamento superficial (Q), uso e cobertura do solo e geologia. Esses fatores foram selecionados com base na literatura e são de natureza nominal, ordinal e razão. Todos os fatores foram classificados usando um método quantil, requerido para a análise de Razão Frequência (TEHRANY *et al.*, 2015b). O método permitiu produzir classes de suscetibilidade com o mesmo

número de ocorrências. Os índices de probabilidade de inundação foram classificados em cinco zonas de suscetibilidade, a saber, muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. O fluxograma da Figura 2 apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa.

Produtos derivados do Modelo Digital de Elevação – MDE

O Modelo Digital de Elevação (MDE) usado neste trabalho foi obtido a partir de curvas de nível com equidistância de 5 m, disponibilizado no geoportal do GDF. As curvas de nível foram interpoladas utilizando o método *Topo to Raster* no ArcGIS, que é especificamente desenhado para a obtenção de MDE's hidrologicamente consistido (ESRI, 2018). A partir do MDE, foram obtidos a declividade, curvatura, aspecto e hipsometria. A declividade é um dos fatores de influência mais importantes no estudo da inundação em uma bacia, pois tem efeito direto no escoamento superficial e infiltração, além de ter um papel decisivo na erosão do solo. A declividade foi classificada em seis classes (0% - 3%; 3% - 8%; 8% - 20%; 20% - 45%; 45% - 75%; > 75%).

Figura 2. Fluxograma dos métodos utilizados nesta pesquisa para a confecção do Mapa de Suscetibilidade à inundação



Fonte: Os Autores.

A curvatura do terreno reflete a forma da área analisada (KHOSRAVI *et al.*, 2019). Três classes foram atribuídas à curvatura: a negativa representa a concavidade do terreno, a curvatura positiva representa a convexidade do terreno e a curvatura zero representa a planicidade.

O aspecto é um fator importante para a análise da estabilidade geomorfológica por controlar alguns parâmetros, como a exposição à radiação solar, vento, intensidade de precipitação e umidade do solo (HAGHIZADEH *et al.*, 2017). Uma aplicação de fator aspecto é determinar a direção do fluxo de água (HONG *et al.* 2017). Esse fator foi dividido em nove classes: *flat, north, northeast, east, southeast, south, southwest, west and northwest*.

O estudo de altimetria é relevante para a análise das formas do relevo, indicando condições mais propícias aos escoamentos das águas nas áreas de maior altitude e de acumulação hídrica para as áreas de menor altitude (MIRANDA *et al.*, 2019).

Distância dos rios

De acordo com Mojaddadi *et al.* (2017), ocorrências de inundações são frequentes ao

longo do curso d'água. A distância dos rios foi considerada um fator de influência relacionado à geomorfologia da área. O mapeamento da distância dos rios foi gerado por influenciar o potencial de infiltração de solo (PHAM *et al.*, 2015). A distância dos rios é representada pela proximidade de rios e drenagens na área e é importante, pois o nível dos rios sobe devido às chuvas fortes, podendo causar extravasamento das águas, inundando áreas mais próximas. Quanto mais distante do rio, menor a possibilidade de sofrer com esse fenômeno. Esse produto foi gerado a partir do vetor de hidrologia disponibilizado no geoportão de GDF usando a ferramenta *Euclidian Distance* no ArcGIS. O fator de distância dos rios é contínuo e varia de zero a 4.343,28 metros, ou seja, quanto mais próximo dos rios o valor atribuído ao pixel é próximo de zero.

Índice de Potência de Escoamento (Stream Power Index – SPI)

O índice de potência de escoamento (SPI) é baseado na suposição de que o escoamento é relativo a uma superfície topográfica específica, sendo este a medida de potencial de erosão no

escoamento de água (MOORE *et al.*, 1991). Em resumo, é o índice que mede o poder erosivo devido ao escoamento superficial (KHOSRAVI *et al.*, 2016). O SPI é calculado pela equação 1.

$$SPI = \alpha \tan \beta \quad (1)$$

Em que:

SPI é o índice de potência de escoamento;

α é a área da bacia (m²);

β é o gradiente de inclinação (em graus).

Índice de Transporte de Sedimento (Sediment Transport Index – STI)

O Índice de Transporte de Sedimento considera a área de contribuição do acréscimo da parte mais alta da declividade, supondo que essa área de contribuição está diretamente relacionada à vazão e à declividade (TEHRANY *et al.*, 2018). É um índice usado para o estudo da erosão e para a convergência e divergência do fluxo de água, tendo efeito na ocorrência de inundações (KHOSRAVI *et al.*, 2019). O STI é definido por Moore *et al.*, (1991) de acordo com a equação 2.

$$STI = \left(\frac{\alpha}{22,13} \right)^{0,6} \left(\frac{\sin \beta}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (2)$$

Em que:

STI é o índice de transporte de sedimento;

α é a área da bacia (m²);

β é o gradiente de inclinação (em graus).

Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index – TWI)

O Índice Topográfico de Umidade (TWI) combina a área de contribuição a montante de uma determinada célula com o declive dessa mesma célula, o que descreve a sua tendência em acumular água (LIMA *et al.*, 2020). A quantidade de fluxo a se acumular em qualquer ponto da área da bacia pode ser calculada pelo TWI e pela tendência da água de descer a encosta usando a força da gravidade (MOORE *et al.*, 1991). O TWI é um índice efetivo para a análise de potencial de inundação (KHOSRAVI *et al.*, 2016). Moore (1991) define TWI conforme a equação 3.

$$TWI = \ln \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \quad (3)$$

Em que:

TWI é o índice de topográfico de umidade;

α é a área da bacia (m²);

β é o gradiente de inclinação (em graus).

Índice de Rugosidade do Terreno (Terrain Roughness Index – TRI)

O índice de Rugosidade do Terreno é um índice topográfico morfométrico amplamente usado em modelagem de suscetibilidade à inundação, que expressa a heterogeneidade da superfície da área de estudo (KORZENIOWSKA *et al.*, 2017). Tal índice é utilizado para verificar a rugosidade do terreno diante da variação altimétrica ao redor de um determinado ponto da superfície. Assim, quanto mais uniforme for o relevo em uma determinada área, menor será o índice de rugosidade (RILEY *et al.*, 1999). O índice calcula a diferença nos valores de elevação de uma célula central (x_{00}) e das oito células vizinhas (x_{ij}), em seguida, ele eleva ao quadrado a somatória das diferenças de elevação para torná-lo positivo. O índice é então derivado tomando a raiz quadrada desse valor e corresponde à mudança de elevação média entre qualquer ponto em uma grade e sua área circundante.

$$TRI = \sqrt{\sum (x_{ij} - x_{00})^2} \quad (4)$$

Em que x_{00} é a célula central e x_{ij} é a média das oito células vizinhas em uma vizinhança de 3x3 pixels.

Índice de Escoamento Superficial (Q)

O índice de escoamento superficial foi obtido utilizando o método da Curva Número (CN). Esse método foi elaborado pelo *United States Department of Agriculture – Soil Conservation Service* (USDA-SCS, 1972) e consiste em identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial, baseando-se no conceito de que a lâmina de escoamento é uma função da altura total da lâmina precipitada, que ocorre devido à infiltração da interceptação vegetal e da retenção em depressões do terreno (ARAÚJO NETO *et al.*, 2012; SANTOS; LOLLO, 2016). Esse índice utiliza o parâmetro CN, que é um índice adimensional de escoamento determinado com base no Grupo Hidrológico do Solo (GHS), uso e cobertura do solo, e nas Condições Antecedentes de Umidade, e varia do

muito permeável, de valor atribuído zero, ao impermeável, de valor 100 (MELESSE *et al.*, 2002). Soares *et al.* (2017) levantam a questão sobre a veracidade dos resultados do método, que atribui pesos numéricos a matrizes resultantes da inter-relação de variáveis importantes, como tipos de solo e uso do solo, e concluem que os resultados desse método podem ser validados com a vazão, refletindo a realidade de maneira satisfatória.

Seguindo a proposta metodológica de Mantovani e Bacani (2018), buscou-se na literatura uma tabela com valores de solos, de acordo com os dados de uso e cobertura, na bacia do Riacho Fundo, usando como base o

National Engineering Handbook da *Natural Resources Conservation Service (United States Department of Agriculture)* e os valores da tabela de Tucci (1993). Classificou-se o solo de acordo com os critérios gerais propostos para elaboração dos grupos hidrológicos de solo (GHS) pelo atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018), e o mapa de solos utilizado neste trabalho foi obtido no site de Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF, 2020). Por fim, o processamento foi efetuado por meio da fusão dos mapas de uso da terra e cobertura do solo e o GHS por meio da extensão *HEC-GeoHMS*, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Estimativa dos valores de CN

Classificação UeO MapBiomias	Classificação SiBCS	Grupo Hidrológico do Solo			
		A	B	C	D
Formação Florestal	Floresta Natural Densa	25	52	62	69
Formação Savânica	Floresta esparsa	46	68	78	84
Formação Campestre	Campos densos, alta transpiração	25	55	70	77
Floresta Plantada	Silvicultura	36	60	70	76
Pastagem	Pastagem	25	59	75	83
Cultura Anual e Perene	Agricultura	68	71	78	81
Infraestrutura Urbana	Áreas Urbanas	77	85	90	92
Outra Área Não vegetada	Solo Exposto	70	80	87	90
Rio, Lago, Oceano	Corpo D'água	100	100	100	100

Fonte: Os Autores.

A segunda etapa do processo consiste em obter a capacidade máxima de armazenamento de água no solo, representada pelo fator S (mm) presente na equação 5:

$$S = \left(\frac{25.400}{CN} \right) - 254 \quad (5)$$

Para o cálculo de índice de escoamento superficial (Q), obteve-se a média mensal de precipitação para o ano de 2018 de seis pluviógrafos, mantidos pela Agência Nacional de Águas (ANA), da Companhia de Água e Esgoto de Brasília (CAESB) e do PTARH/UnB. Para a geração da superfície, utilizou-se o método de interpolação determinístico da Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW), que determina como valores das células uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados (ESRI, 2018).

A etapa final consiste em obter o dado matricial de Índice de Escoamento Superficial (Q,

equação 6).

$$Q = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S} \quad (6)$$

Em que:

P corresponde à precipitação média mensal (mm/mês);

S é a capacidade máxima de armazenamento de água (saturação em mm) da camada superior do solo na bacia hidrográfica.

Uso e Cobertura do Solo

O entendimento detalhado do uso e cobertura do solo é essencial para a modelagem de vulnerabilidade a desastres naturais. Áreas de vegetação são menos propícias a inundação, enquanto áreas urbanas são tipicamente compostas por superfícies impermeabilizantes e solo compactado, tornando-as mais suscetíveis a inundações (MOJADDADI *et al.*, 2017). Foi utilizado o mapa de uso e cobertura do solo

disponibilizado pelo MapBiomas para o ano de 2018, em uma escala de 1:100.000 e possui nove classes.

Geologia

A formação litológica do solo informa sobre a capacidade do solo em absorver água, que está relacionada diretamente à geologia (RAMESH; IQBAL, 2020). Os dados de geologia foram obtidos do trabalho de Campos *et al.* (2013), e os tipos litológicos encontrados na área são: ardósia, quartzito fino e ritmito.

Razão de Frequência (FR)

O método da Razão de Frequência é uma análise estatística bivariada com o propósito de estabelecer uma correlação quantitativa entre uma variável dependente e outra independente (equação 7). Esse método foi usado para avaliar o impacto da ocorrência de inundações de acordo com cada um dos fatores de influência escolhidos. A FR é a expressão da razão de probabilidade de uma ocorrência com relação a uma não-ocorrência para um atributo qualquer. Quanto maior for o valor FR, mais substancial é a relação entre a ocorrência do fenômeno e uma variável específica (RAHMATHI *et al.*, 2015). O índice suscetibilidade à inundação (FSI) (equação 8) é calculado como a soma das razões frequências (FR) para todos os parâmetros ou fatores (KHOSRAVI *et al.*, 2016).

$$FR = \left[\frac{N_{\text{pix}}(SX_i)}{\sum_{i=1}^m SX_i} \right] / \left[\frac{N_{\text{pix}}(X_j)}{\sum_{j=1}^n N_{\text{pix}}(X_j)} \right] \quad (7)$$

$$FSI = \sum_{j=1}^n FR \quad (8)$$

Em que:

$N_{\text{pix}}(SX_i)$ é o número de pixels de ocorrência de inundação dentro de uma classe i do fator variável X_i ;

$N_{\text{pix}}(X_j)$ é o número de pixels total dentro de um fator variável de uma classe i do fator variável X_i ;

m é o número de classes nos parâmetros variáveis X_i ;

n é o número de fatores na área de estudo.

A razão de frequência (FR) mais alta indica uma forte correlação entre os fatores condicionantes e as ocorrências de inundações (TEHRANY *et al.* 2014). Portanto, os valores maiores ou menores

que 1 (um) representam uma relação forte ou fraca, respectivamente (PRADHAN *et al.*, 2014).

Na tentativa de mostrar a relação entre as áreas inundadas identificadas com o valor de FR, também foi realizada uma análise de correlação entre as classes dos fatores condicionantes com o valor de FR. O modelo mostra a probabilidade de FR para cada fator de condicionante.

Validação

A validação foi feita utilizando o método chamado Área Sob a Curva (*Area Under Curve – AUC*) com pontos de validação nos locais de inundação (Figura 1). O método é utilizado para uma avaliação quantitativa de acurácia de predição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Distribuição dos fatores condicionantes

Os parâmetros independentes assinalados – declividade (Figura 3A), curvatura (Figura 3B), hipsometria (Figura 3C), índice de potência de escoamento (*Stream Power Index – SPI*) (Figura 3D), índice de rugosidade do terreno (*Terrain Roughness Index – TRI*) (Figura 3E), índice de transporte de sedimento (*Sediment Transport Index – STI*) (Figura 3F), índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index – TWI*) (Figura 3G), índice de escoamento superficial (Figura 3H), distância dos rios (Figura 3I), aspecto (Figura 3J), uso e cobertura do solo (Figura 3K) e geologia (Figura 3L) – foram considerados para a estimativa do Índice de Suscetibilidade à Inundação (FSI) para a unidade hidrográfica do Riacho Fundo. Os mapas de cada um dos fatores, incluindo os índices estão na Figura 3.

A maior parte da área consiste em uma porcentagem de declividade de 8-20%, conforme Figura 3A. Essa categoria se localiza em maior quantidade na região noroeste do mapa, na região do Vicente Pires. As regiões com mais de 75% de inclinação encontram-se na região central e centro-oeste da unidade hidrográfica. Espera-se que as regiões de declive mais acentuada possuam um maior potencial de escoamento.

O fator de curvatura (Figura 3B) da unidade hidrográfica mostra áreas predominantemente planas e côncavas e que, praticamente, não há áreas onde a convexidade é proeminente. Com relação ao fator aspecto, o direcionamento dos

pixels é condizente com a direção do curso da hidrografia. O fator hipsometria (Figura 3C) encontra-se com uma variação de 265 metros entre o ponto mais alto da unidade hidrográfica, que atinge o patamar de 1.275 m, e o ponto mais baixo da unidade, de 1.005 m. As áreas mais altas encontram-se ao norte, percorrendo toda a direção leste até o ponto sul da unidade hidrográfica. O fator distância (Figura 3I) dos rios mostra uma gradação da distância a partir do rio, de valor zero, até o ponto mais distante do rio, que está a 4.343,28 m e se localiza na região do extremo sul do mapa. Essa região é um misto de área urbana e vegetação natural de cerrado.

O fator SPI (Figura 3F) concentra-se ao longo do leito do rio e, em seu ponto mais alto, o índice indica um valor de 14.205, e, no restante da unidade, encontram-se os valores mais baixos. Geralmente, áreas com SPI de valores mais baixos são regiões mais suscetíveis à inundação. Isso é devido ao fato da maioria das regiões com alto valor de SPI estarem localizadas na declividade das encostas e em áreas íngremes, onde as inundações não ocorrem (MOJADDADI *et al.*, 2017). As áreas com menor valor de capacidade de STI (Figura 3F) estão localizadas nas áreas mais planas, portanto, com maior probabilidade a inundação. Essas áreas se concentram nos leitos dos rios e córregos da unidade hidrográfica, pois são áreas de depósito de sedimentos e de intenso trânsito dessa sedimentação. As áreas de menor valor de STI, que compreendem a maior parte da bacia, mostram que há menor suscetibilidade de inundação.

Quanto ao fator TWI (Figura 3G), os maiores valores encontram-se nos leitos dos rios e nas áreas planas da unidade hidrográfica, denotando que essas áreas possuem uma concentração de umidade maior que as áreas de maior elevação, côncavas ou convexas.

O fator TRI (Figura 3E) evidencia seus maiores valores nas áreas de encosta da unidade hidrográfica, locais de declividade mais íngreme e de escoamento das águas superficiais do terreno, onde irão desembocar nos rios e córregos da unidade. Essas áreas apresentam maior irregularidade topográfica no terreno.

O fator de escoamento superficial (Figura 3H) demonstra que os valores intermediários desse índice se encontram nas áreas de maior elevação, havendo um rápido aumento nos valores na medida em que há o aumento da declividade e a diminuição da elevação, sendo

que os valores mais altos encontram-se nas encostas presentes na unidade hidrográfica.

O fator uso e cobertura do solo (Figura 3K) é o fator principal de influência no modelo. Tal dado mostra que cerca de 80% da área de unidade hidrográfica é composta da classe área urbana, que é uma das classes que mais contribui para a inundação em uma localidade.

A geologia da unidade (Figura 3L) é composta por três tipos de rochas e mostra-se muito influente na determinação de suscetibilidade à inundação. Esse fator influencia a infiltração da água da chuva, recarregando os lençóis freáticos da bacia hidrográfica. Áreas mais permeáveis favorecem o processo de infiltração, porém, ressalta-se que as áreas de maior impermeabilização do solo têm a influência do fator geológico anulado com relação à permeabilidade e intensifica o processo de escoamento superficial, principalmente onde as declividades são altas e médias e a curvatura é côncava (REIS *et al.*, 2012).

Aplicação do modelo de Razão Frequência (FR)

A relação entre a ocorrência de inundação e cada um dos fatores condicionantes foi estabelecida por meio da análise de FR. O modelo atribui a cada fator de influência um peso baseado na quantidade de pixels de cada fator presente nas áreas com histórico de inundação já previamente mapeadas. A ordem dos fatores de influência foi: (i) Uso e Cobertura do Solo (maior influência); (ii) Geologia; (iii) Curvatura; (iv) SPI; (v) TRI; (vi) Escoamento Superficial; (vii) Elevação; (viii) Distância do rio; (ix) STI; (x) Declividade; (xi) TWI; e (xii) Aspecto (Tabela 2).

Para mapear os locais de inundação na área de estudo é importante explicar a correlação entre as inundações e os diferentes fatores condicionantes. O modelo de probabilidade de FR para cada fator de condicionante foi calculado conforme mostrado na Tabela 3.

Nos resultados da aplicação do método FR, 99% dos pixels do fator declividade se encontram na classe de declividade até 14^o, mostrando que inundações são mais propícias a ocorrerem em áreas de baixo declive. A integração desses dados com o fator hipsometria evidencia um valor de FR mais alto para a classe entre 1.113 a 1.160 m, sugerindo que as inundações ocorrem em áreas de baixa declividade e de altitude intermediária nesta unidade hidrográfica. O fator aspecto mostra que a correlação entre a

inundação e esse fator é mais forte na região sul e sudeste da unidade, por apresentar maior valor de FR, indicando que a maioria dos pixels dos pontos de inundação aponta para essa direção. A região sudeste é a direção para onde corre o fluxo da hidrografia e é a região com mais pontos de inundação.

O fator TWI apresenta valor de FR >1 para a primeira e a segunda classe, revelando que a correlação entre o fator inundação tende a ocorrer nas regiões de menor valor de TWI de classes, enquanto as regiões de maior valor de classe decrescem de importância.

O fator STI evidenciou que praticamente somente a primeira classe possui valor FR = 1. Quanto ao fator distância dos rios, os resultados mostram que a primeira e a segunda classe, as de menores distâncias, têm maior influência de inundação por ter um valor FR >1 e ser o maior valor entre as classes. Esse fator condicionante tem um valor $R^2=0,62$, assinalando uma relação de força intermediária entre as classes e o valor de FR. Isso indica que a proximidade ao leito do rio é um fator de risco à inundação.

Observando o mapa de uso e cobertura do solo na unidade, notam-se áreas urbanas às margens dos principais rios e córregos. O distanciamento dos cursos d'água respeita as áreas de proteção permanente na unidade, que influencia diretamente na contenção dos transbordos dos rios e, portanto, nas inundações e enchentes.

O fator de escoamento superficial também apresenta alta contribuição para a inundação no local, com uma relação entre as classes em áreas inundadas, onde seu fator de maior influência ocorre nas áreas de maior urbanização, indicando uma correlação com a impermeabilidade do terreno. Essa impermeabilidade mostra-se relacionada ao fator de urbanização e, por sua vez, influencia diretamente no escoamento superficial. O maior valor de FR está na classe de valores entre 1,64 e 2,09.

Para mapear os locais de inundação na área de estudo é importante explicar a correlação entre as inundações e os diferentes fatores de condição. O modelo de probabilidade de FR para cada fator de condicionante foi calculado conforme mostrado na Tabela 2.

O fator TRI mostra a segunda classe com valor de FR > 1, denotando que a maior parte das inundações acontece nesse intervalo de valores. A determinação do fator TRI com a inundação é de $R^2=0,82$, revelando uma forte relação entre as

áreas inundadas e o FR. As áreas de inundação encontram-se em regiões de baixo valor de TRI, sugerindo que quanto menor a rugosidade do terreno, mais propício e influente ele é para o fenômeno da inundação, que tende a acontecer em locais planos. O fator SPI mostrou, assim como o fator TWI, que somente os valores mais baixos do fator contribuem para a inundação e que possuem grande potencial de inundação as áreas mais baixas do terreno. A segunda classe de valores apresentou um valor de FR >1, indicando que as inundações tendem a acontecer mais nesse intervalo de valores, enquanto as classes de valores superiores não influenciam nas inundações.

O fator curvatura teve um valor de FR > 1 para áreas de inundação que estão na classe plana do terreno, assinalando que inundações só podem ocorrer em áreas planas. O fator geologia mostrou-se o segundo fator de maior influência no modelo. O valor FR > 1 está em locais onde há a presença de ardósia, enquanto 25,53% estão em área de rocha denominada ritmito.

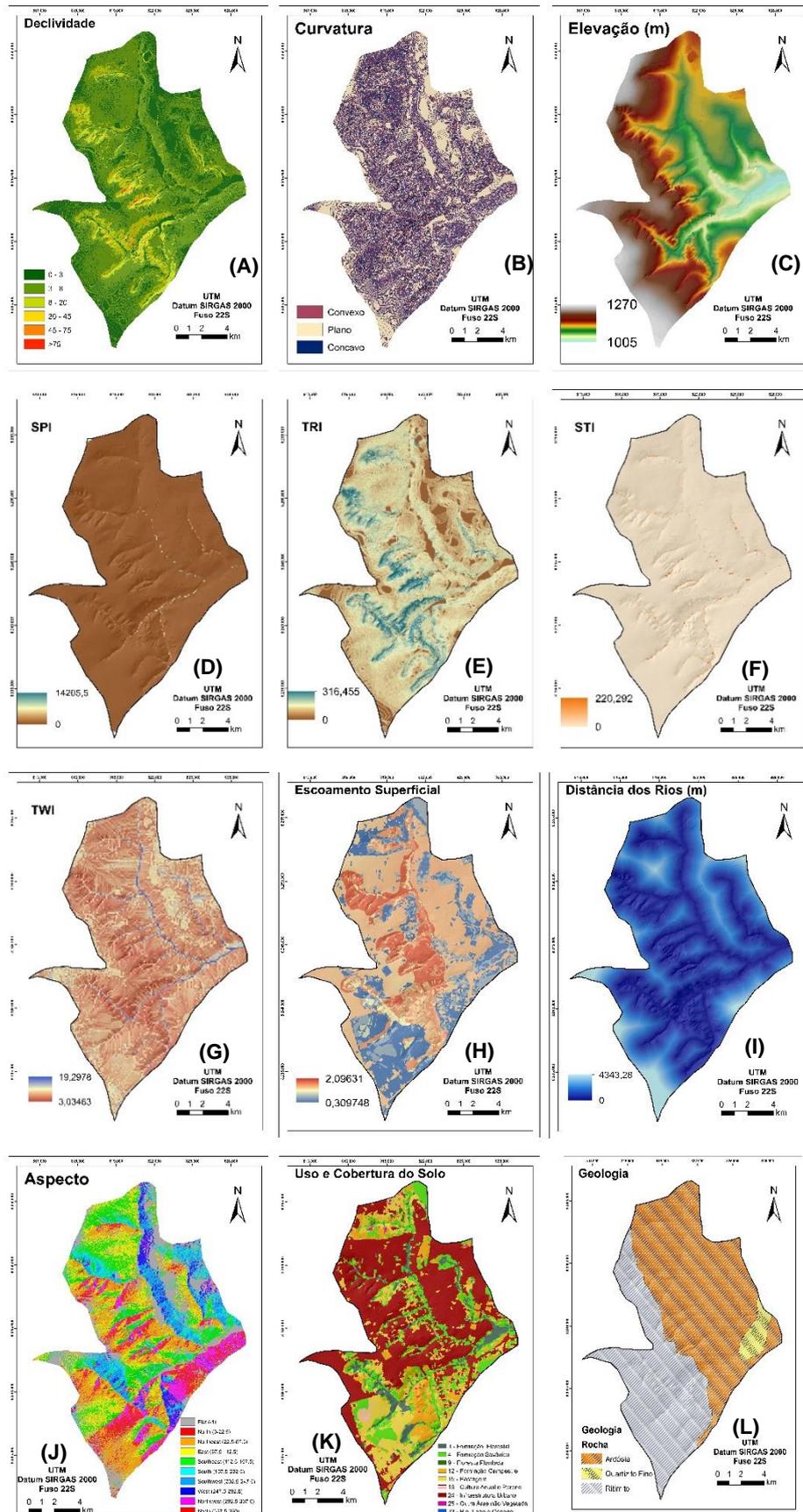
A relação entre cada fator condicionante e seu valor de FR é apresentada na Tabela 3.

O fator mais fortemente influente é o fator de uso e cobertura de solo. Esse fator mostra que o valor FR > 1 está na classe denominada área urbana, com uma correlação $R^2=0,98$ e maior peso de predição (*Prediction Rate* – PR). Essa é a condição mais importante para a ocorrência de inundações, de acordo com este estudo, com a literatura e com a observação dos locais, na unidade hidrográfica aqui pesquisada. A presença de área urbana impermeabiliza o solo, impedindo a infiltração de água no lençol freático.

Integrando os fatores mais influentes para a ocorrência de inundação, formou-se o mapa da Figura 4. Nota-se que áreas onde há alto grau de inclinação da declividade e a presença de área impermeabilizada na região, há uma maior geração de escoamento superficial e aumento da velocidade da movimentação da água. Essa água irá se depositar nas regiões planas e de menor elevação e, a depender do grau de permeabilidade da rocha, que compõe a geologia do local e de outros fatores marginais, como o fator TWI, TRI, SPI e STI, áreas de inundação podem ser geradas.

A validação do mapa de suscetibilidade com dado de treino apresentou um resultado de AUC de 85,75% e um resultado de 93,53%, mostrando que, para essa unidade hidrográfica, os pontos de teste favoreceram um mapa de suscetibilidade

Figura 3. Mapas dos fatores de influência da Bacia do Riacho Fundo (DF)



Fonte: Os autores.

Tabela 2 – Resultados da razão frequência de cada fator

Fator Condicionante	Classes	Número de pixels	% de pixels por classe	Número de pixels inundados	% de pixels inundados	Frequencia Razão (FR)
Declividade (Graus)	< 7	1202733	94,2%	41713	91,7%	0,97
	7 a 14	63471	5,0%	3498	7,7%	1,55
	14 a 22	9105	0,7%	270	0,6%	0,83
	22 a 29	1574	0,1%	25	0,1%	0,45
	> 29	379	0,0%	2	0,0%	0,15
Curvatura	Côncavo	519	0,0%	2	0,0%	0,11
	Plano	1276843	99,6%	45453	99,9%	1,00
	Convexo	5064	0,4%	53	0,1%	0,29
Aspecto	Flat (-1)	374370	29,3%	7065	15,5%	0,53
	North (0-22.5)	190552	14,9%	2015	4,4%	0,30
	Northeast (22.5-67.5)	228530	17,9%	11612	25,5%	1,43
	East (67.5-112.5)	134662	10,5%	4953	10,9%	1,03
	Southeast (112.5-157.5)	82905	6,5%	6062	13,3%	2,05
	South (157.5-202.5)	78692	6,2%	5842	12,8%	2,08
	Southwest (202.5-247.5)	62597	4,9%	4119	9,1%	1,85
	West (247.5-292.5)	55078	4,3%	1677	3,7%	0,85
	Northwest (292.5-337.5)	69876	5,5%	2163	4,8%	0,87
Elevação (m)	1.005 - 1.066	160502	12,5%	1781	3,9%	0,31
	1.066 - 1.113	406990	31,7%	14989	32,9%	1,04
	1.113 - 1.160	304998	23,8%	20361	44,7%	1,88
	1.160 - 1.208	262163	20,4%	8377	18,4%	0,90
	1.208 - 1.270	147773	11,5%	0	0,0%	0,00
Distância dos Rios (m)	0 – 340	950056	74,0%	34575	76,0%	1,03
	340 – 783	277984	21,7%	10547	23,2%	1,07
	783 - 1.328	41577	3,2%	386	0,8%	0,26
	1.328 - 2.197	11586	0,9%	0	0,0%	0,00
	2.197 - 4.343	2476	0,2%	0	0,0%	0,00
SPI	0 – 445	1274557	99,7%	45336	99,6%	1,00
	445 - 1.615	2848	0,2%	172	0,4%	1,70
	1.615 - 3.063	456	0,0%	0	0,0%	0,00
	3.063 - 5.737	192	0,0%	0	0,0%	0,00
	5.737 - 14.205	128	0,0%	0	0,0%	0,00
STI	0 – 7	1267989	99,2%	45252	99,4%	1,00
	7,77 - 30,23	7688	0,6%	236	0,5%	0,86
	30,23 - 65,65	1536	0,1%	20	0,0%	0,37
	65,65 - 120,08	840	0,1%	0	0,0%	0,00
	120,08 - 220,29	128	0,0%	0	0,0%	0,00
TWI	3,03 - 6,41	312510	24,4%	12258	26,9%	1,10
	6,41 - 8,32	766320	60,0%	28196	62,0%	1,03
	8,32 - 10,56	161142	12,6%	4085	9,0%	0,71
	10,56 - 14,13	26361	2,1%	882	1,9%	0,94
	14,13 - 19,29	11848	0,9%	87	0,2%	0,21
TRI	0 - 49,64	338022	26,1%	6035	13,3%	0,51

	49,64 - 85,62	854674	65,9%	37460	82,3%	1,25	
	85,62 - 116,65	94331	7,3%	1947	4,3%	0,59	
	116,65 - 158,84	9510	0,7%	66	0,1%	0,20	
	158,84 - 316,45	642	0,0%	0	0,0%	0,00	
Escoamento Superficial	0,30 - 0,55	285376	22,3%	497	1,1%	0,05	
	0,55 - 0,91	145392	11,3%	1042	2,3%	0,20	
	0,91 - 1,33	84035	6,6%	4052	8,9%	1,36	
	1,33 - 1,64	635795	49,6%	27427	60,3%	1,22	
	1,64 - 2,09	131385	10,2%	12490	27,4%	2,68	
Uso e Cobertura do solo	3 - Formação Florestal	289994	23,3%	2090,00014	4,7%	0,20	
	4 - Formação Savânica	2053	0,2%	0	0,0%	0,00	
	9 - Floresta Plantada	125985	10,1%	88,000006	0,2%	0,02	
	12 - Formação Campestre	207808	16,7%	348,000024	0,8%	0,05	
	15 - Pastagem	6247	0,5%	49,000003	0,1%	0,22	
	19 - Cultura Anual e Perene	0	0,0%	0	0,0%	0,00	
	24 - Infraestrutura Urbana	612608	49,2%	41591,0029	94,2%	1,91	
	25 - Outra Área não Vegetada	0	0,0%	0	0,0%	0,00	
	33 - Rio, Lago e Oceano	252	0,0%	0	0,0%	0,00	
	Geologia	MNPps	505748	39,4%	11620	25,5%	0,65
		MNPpr3	735199	57,3%	33886	74,5%	1,30
		MNPpa	42732	3,3%	2	0,0%	0,00

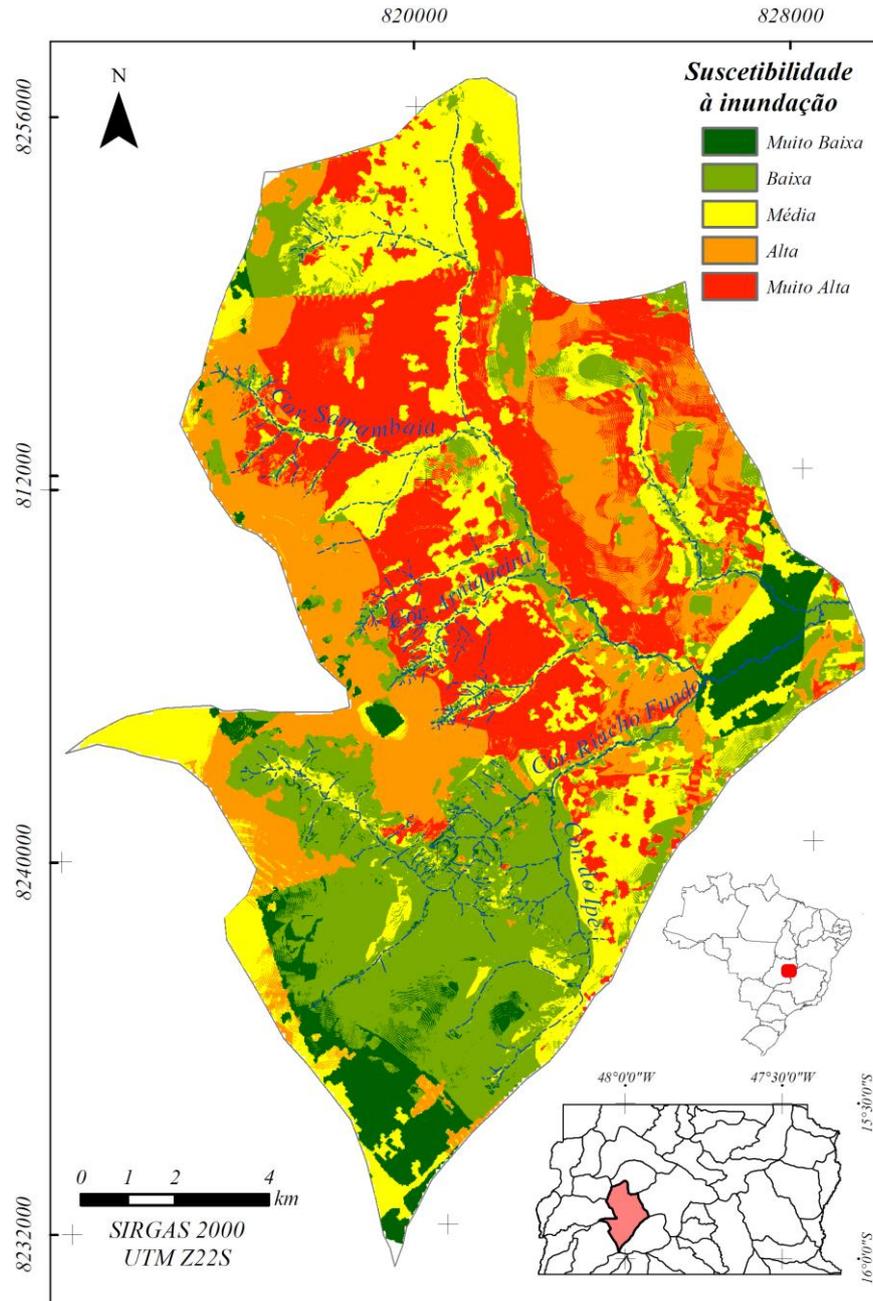
Fonte: Os Autores.

Tabela 3 – Relação entre áreas inundadas e o valor FR

Fator Condicionante	Regressão Linear	R ²
Aspecto	$y = 8E-05x + 0,837$	0,12
TWI	$1E-05x + 0,4223$	0,35
Declividade	$y = 8E-06x + 0,719$	0,07
STI	$1E-05x + 0,4223$	0,44
Distância do rio	$y = 8E-05x + 0,837$	0,62
Elevação	$y = 8E-05x + 0,837$	0,94
Escoamento superficial	$3E-05x + 0,2624$	0,21
TRI	$3E-05x + 0,2624$	0,82
SPI	$1E-05x + 0,4223$	0,11
Curvatura	$y = 8E-06x + 0,719$	0,96
Geologia	$y = 4E-05x + 0,0465$	0,96
Uso e cobertura	$y = 4E-05x + 0,0465$	0,98

Fonte: Os Autores.

Figura 4. Mapa de Suscetibilidade à inundação da Bacia do Riacho Fundo (DF)



Fonte: Os autores.

Vicente Pires

A devastação e prejuízo também ocorrem nas áreas por onde o fluxo do escoamento passa, e não apenas nas áreas onde se depositam. Esse parece ser o problema que ocorre com a região do Vicente Pires, centro norte da bacia estudada. A Figura 5 mostra um recorte da região no mapa de suscetibilidade, e indica que é uma área que apresenta o índice muito alto, como predominante aos eventos de inundação.

As áreas onde o fluxo de escoamento é alto se caracterizam por elevada urbanização e

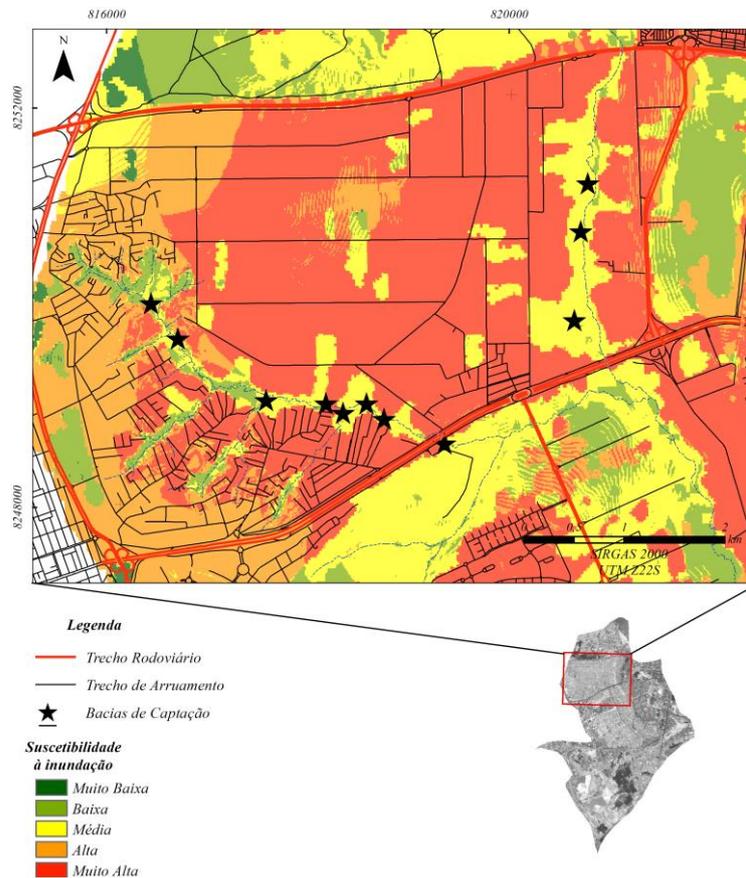
declividade acentuada. Há um grau muito alto de impermeabilização do solo; e há um projeto, ainda em andamento, de bacias de contenção nos pontos de maior ocorrência de inundações.

Na Figura 5, foram inseridas as bacias de retenção já construídas no Vicente Pires, e percebe-se que a localização destas são a jusante das mais críticas à inundação; o que indica o posicionamento inadequado das mesmas. Na região, há problemas de invasão de terra e grilagem, o que comprova a existência de ocupações em Área de Proteção Permanente

(APP), próximas ao córrego do Vicente Pires e do córrego Samambaia. A instalação das bacias de retenção auxilia na preservação dos corpos hídricos receptores, com lançamentos de vazões

menores, porém, não são capazes de aliviar a pressão nos sistemas de drenagem urbana para prevenção de inundações.

Figura 5. Mapa de suscetibilidade à inundação na região do Vicente Pires com a localização das bacias de retenção



Fonte: Os autores.

CONCLUSÃO

O método RF utilizado para construir o mapa de suscetibilidade à inundação mostrou-se representativo da situação dos casos desse fenômeno na Bacia do Riacho Fundo e, especificamente, na região do Vicente Pires, apontando as áreas suscetíveis a esse impacto ambiental.

Os fatores condicionantes que mais influenciaram o modelo de inundação foram o Uso e Cobertura do Solo, a geologia do local e a curvatura. Tais fatores mostram que, para essa unidade hidrográfica, a urbanização tem um efeito determinante nos locais de inundação, devido à alta impermeabilização do solo que a urbanização trás. A geologia indica que o

nível de penetração da água no solo é bastante dependente do tipo de rocha e que inundações ocorrem a montante em áreas planas da unidade. Os fatores de aspecto do terreno e TWI têm menor influência no modelo.

As áreas de menor risco de inundação encontram-se nas regiões de remanescentes de vegetação nativa, como formação campestre, formação savânica e agricultura, as quais se localizam ao sul da unidade hidrográfica. A região onde se encontra uma mancha de quartzito apresentou uma baixa suscetibilidade à inundação. As regiões de maior risco de inundação estão localizadas nas regiões de alta urbanização, com declividade

acentuada e alto escoamento superficial devido à impermeabilização do solo, no qual a implantação de áreas verdes e permeáveis pode ajudar na redução de enxurradas e inundações na região, pois essas áreas retêm o escoamento superficial, reduzindo a velocidade do escoamento e permitindo a infiltração da água superficial. Com isso, minimiza-se o efeito das áreas de baixa altitude e próximas aos córregos, as quais, também, representam locais de alta suscetibilidade à inundação. As áreas de suscetibilidade média ou intermediária localizam-se em regiões moderadamente urbanizadas, com declividade e fator TRI acentuadas, porém, são pontos sem histórico de inundação nos últimos dez anos e se encontram em locais de maior elevação.

O mapa de suscetibilidade à inundação deve ser elaborado antes da construção das Bacias de Detenção, a fim de otimizar suas funções, não só para amortecimento de vazões, mas, também, para diminuir as inundações dentro das áreas urbanas.

Agradecimentos

Ao professor José Eloi Campos por disponibilizar os *shapes* de geologia da unidade hidrográfica; ao professor Sérgio Koide, à mestrandia Daniela Carvalho e ao PTARH-UnB por dispor parte dos dados de precipitação de três pluviômetros usados neste trabalho; e ao Instituto de Geociências por franquear o Laboratório de Sensoriamento Remoto, seu equipamento de processamento dos dados e a utilização do *software* ArcGIS.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASÍLIA. Subsecretaria de Divulgação Secretaria de Estado de Comunicação do DF. 2019. Disponível em: <https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2019/06/08/lagoas-de-captacao-vaio-dar-vazao-as-aguas-de-chuvas-em-vicente-pires/>. Acesso: 31 ago. 2020.

ALI, S. A.; PARVIN, F.; PHAM, Q. B.; VOJTEK, M.; VOJTEKOVÁ, J.; COSTACHE, R.; LINH, N.

T. T.; NGUYEN, H. Q.; AHMAD, A.; GHORBANI, M. A. GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: A case of Topľa basin, Slovakia. **Ecological Indicators**, 117 [Online] 1066202. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620>. Acesso em: 22 ago. 2020.

AQUINO, I. G.; ROIG, H. L.; OLIVEIRA, E. S.; GARNIER, J.; GUIMARÃES, E. M.; KOIDE, S. Variação temporal da descarga sólida em suspensão e identificação de minerais a partir de aperfeiçoamento de método de amostragem automática no Córrego Riacho Fundo, Brasília, Distrito Federal. **Geol. USP, Sér. cient.**, USP, v. 18, n. 2, p. 17-185, 2018.

ARAÚJO NETO, J. R. de; PALÁCIO, H. A. de Q.; De ANDRADE, E. M.; DOS SANTOS, J. C. N.; PINHEIRO, E. A. R. Optimization of the cuver number (cn-scs) for different management in a semiarid region, Ceará, Brasil. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 264-279, 2012. BUI, D. T.; TSANGARATOS, P.; NGO, P. T.; PHAM, T. D.; PHAM, B. T. Flash flood susceptibility modeling using an optimized fuzzy rule based feature selection technique and tree based ensemble methods. **Science of the Total Environment**, n. 668, p. 1038-1054, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.422>. Acesso em: 22 ago. 2020.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A.; FREITAS-SILVA, F. H.; MARTINS-FERREIRA, M. A. C. Geologia do Grupo Paranoá na porção externa da Faixa Brasília. **Brazilian Journal of Geology** [Online], São Paulo, v. 43, n. 3, p. 461-476, set. 2013. DOI: 10.5327/Z2317-48892013000300004 Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/2013/n.3/d.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2020.

CANIANI D.; PASCALE S.; SDAO F.; SOLE A. Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza. **Nat Hazards** v. 45, n. 1, p. 55-72, 2008.

CEOLIN, L.F.; COSTA, M.E.L.; KOIDE, S. Estudo hidráulico-hidrológico de uma bacia de detenção em Vicente Pires/DF. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu—

PR: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2019.

DANO, U.; BALOGUN, A.-L.; MATORI, A.-N.; WAN YUSOUF, K.; RIMI ABUBAKAR, I.; SAID MOHAMED, M.; PRADHAN, B. Flood susceptibility mapping using GIS-based analytic network process: a case study of Perlis, Malaysia. **Water**, v. 11, n. 3, p. 615, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w11030615>. Acesso em: 22 ago. 2020.

DE PAULA, A. C. V.; COSTA, M.E.L.; KOIDE, S. Drenagem urbana – análise de problemas de novos loteamentos – estudo de caso no setor habitacional Vicente Pires. In. ENCONTRO NACIONAL DE ÁGUAS URBANAS, 11., 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte-MG: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Humberto Gonçalves dos Santos [et al.]. – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. ISBN 978-85-7035-800-4

ESRI – Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS Desktop**: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2018.

HAGHIZADEH, A.; SIAHKAMARI, S.; ZEINIVAND, H.; TAHMASEBPOUR, N.; RHAMTI, O. Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models. **Geocarto International**, v. 33, n. 9 p. 927-941, 2017. DOI: 10.1080/10106049.2017.1316780.

HIPÓLITO, M. T.; COSTA, T. C. C.; BARROS, L. C.; VIANA, A. A. O. N. **Alocação de barraginhas com uso de modelagem hidrológica e geoprocessamento**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019. 28 p. : il. -- (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Milho e Sorgo, ISSN 1679-0154; 190).

HONG, H.; PRADHAN, B.; SAMEEN, M. I.; CHEN, W.; XU, C. Spatial prediction of rotational landslide using geographically weighted regression, logistic regression, and support vector machine models in Xing Guo area (China), **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1997-2022 2017. DOI: 10.1080/19475705.2017.1403974

KHOSRAVI, K.; SHAHABIB, H.; PHAM, B. T.; ADAMOWSKID, J.; SHIRZADIE, A.; PRADHAN, B.; DOUH, J.; HAI-BANG, L.; GRÓFJ, G.; HOK, H. L.; HONGL, H.; CHAPI, K. 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, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.073>. Acesso em: 22 ago.2020.

_____; NOHANI, E.; MAROUFINIA, E.; POURGHASEMI, H. R. A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. **Natural Hazards**, n. 83, p. 947-987, 2016. DOI 10.1007/s11069-016-2357-2.

KIA M.B.; PIRASTEH, S.; PRADHAN, B.; MAHMUD, A.R.; SULAIMAN, W.N.A.; MORADI, A. An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin Malaysia. **Environmental Earth Scientific**, v. 67, n. 1, p. 251-264, 2012.

KORZENIOWSKA, K.; PFEIFER, N.; LANDTWING, S. Mapping gullies, dunes, lava fields, and landslides via surface roughness, **Geomorphology**, n. 301, p. 53-67, 2017. Doi:10.1016/j.geomorph.2017.10.011

LIMA, I. F.; FERNANDES, N. F.; VARGAS JUNIOR, E. A. Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na Região Serrana do Rio de Janeiro. **Rev. Bras. Geomorfol.** (Online), São Paulo, v. 21, n. 2, p. 399-419, abr./jun. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/www.ugb.org.br/rbg.v21i2.1515>. Acesso em: 30 ago. 2020. MANTOVANI, J. R.; BACANI, V. M. Uma proposta metodológica de mapeamento de áreas suscetíveis à inundação e/ ou alagamento na bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. **Geosp – Espaço e Tempo** (Online), v. 22, n. 3, p. 687-706, dez. 2018. ISSN 2179-0892.

MELESSE, A.M.; SHIH, S.F. Spatially distributed storm runoff depth estimation using Landsat images and GIS/ **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 37, p. 173-183, 2002.

MIRANDA, N. M. G.; CAPRARIO, J.; MARTINI, L. C. P.; FINOTTI, A. R. Processo hierárquico analítico (AHP) em modelagem espacial da vulnerabilidade à inundação em ambientes

mistos. **Anuário do Instituto de Geociências**, UFRJ, v. 42, n. 4, p. 172-181, 2019. ISSN 0101-9759 e-ISSN 1982-3908.

MOJADDADI, H.; PRADHAN, B.; NAMPAK, H.; AHMAD, N.; GHAZALI, A. H. Ensemble machine-learning-based geospatial approach for flood risk assessment using multi-sensor remote-sensing data and GIS. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 8, n. 2, p. 1080-1102, 2017.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R.B.; LADSON, A.R. Digital terrain modelling, a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrol. Process.**, n. 5, p. 3-30, 1991.

NETO, G. B. S.; BAYMA, A. P.; NETO, S. B.; ROIG, H. L.; MENEZES, P. H. B. J. Análise de suscetibilidade a alagamento na Bacia Hidrográfica do Riacho Fundo – Distrito Federal por meio de sistemas de informação geográfica – SIG. **Revista Territorium**, n. 24, p. 77-87, 2017. © Riscos, ISSN: 0872-8941.

PHAM, B.T.; TIEN BUI, D.; POURGHASEMI, H.R.; INDRA, P.; DHOLAKIA, M.B. Landslide susceptibility assessment in the Uttarakhand area (India) using GIS: a comparison study of prediction capability of naïve bayes, multilayer perceptron neural networks, and functional trees methods. **Theor. Appl. Climatol.**, n. 122, p. 1-19, 2015.

PRADHAN, B.; ABOKHARIMA, M.H.; JEBUR, M.N.; TEHRANY, M.S. Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. **Nat. Hazards**, v. 73, n. 2, p. 1-24, 2014.

_____; LEE S. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. **Environ. Model Softw**, v. 25, n. 6, p. 747-759, 2010.

RAHMATI, O.; POURGHASEMI, R. H.; ZEINIVAND, H. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. **Geocarto International**, v. 31, n. 1, p. 42-70, 2015. DOI:10.1080/10106049.2015.1041559

_____; ZEINIVAND, H.; BESHARAT, M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. **Geom. Nat.**

Haz. Risk, v. 7, n. 3, p. 1000-1017, 2016.

RAMESH, V.; IQBAL, S. S. Urban flood susceptibility zonation mapping using evidential belief function, frequency ratio and fuzzy gamma operator models in gis: a case study of greater Mumbai, Maharashtra, India. **Geocarto International** [Online], 2020. DOI: 10.1080/10106049.2020. Disponível em: ISSN: 1010-6049 (Print) 1752-0762 (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/tgei20>

REIS, P. E.; PARIZZI, M. G.; MAGALHÃES, D. M.; MOURA, A.C.M.2012. O Escoamento superficial como condicionante de inundações em Belo Horizonte, MG: Estudo de caso da sub-bacia Córrego de Leitão, Bacia de Ribeirão Arrudas. **Geociências**, UNESP, v. 31, n. 1, p. 31-46, 2012.

RILEY, S.J.; DE GLORIA, S.D.; ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain Journal of Sciences**, n. 5, p. 23-27, 1999.

SAMANTA, R. K.; BHUNIA, G. S.; SHIT, P. K.; POURGHASEMI H.R. Flood susceptibility mapping using geospatial frequency ratio technique: a case study of Subarnarekha River Basin, India. **Modeling Earth Systems and Environment** [Online], n. 4, p. 395-408, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0427-z>. Acesso em: 31 ago. 2020.

SANTOS, F.M., LOLLO, J.A., 2016. Cartografia Digital para Estimativa de Escoamento Superficial Visando ao Planejamento Urbano. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 21, n. 4, p. 663-675, out./dez. 2016.

SCS – Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**, USDA, 1972.

SEMARH Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal. **Olhares sobre o lago Paranoá**. Brasília, 1999.

SOARES, M. R. G. de J.; FIORI, C. O.; SILVEIRA, C. T. da; KAVISKI, E. Eficiência do método curve number de retenção de águas pluviais. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, e16001, 2017. DOI: <https://doi.org/10.4215/rm2017.e16001> ISSN: 1984-2201.

TEHRANY, M. S.; LEE, M. J.; PRADHAN, B.; JEBUR, M. N.; LEE, S. Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and

multivariate statistical models. **Environ. Earth Sci.**, v. 72, n. 10, p. 4001-4015, 2014.

_____; PRADHAN, B.; MANSOR, S.; AHMAD, N. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. **Catena**, n. 125, p. 91-101, 2015.

_____; _____; JEBUR, M. N. Flood susceptibility analysis and its verification using a novel ensemble support vector machine and frequency ratio method. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment** [online], v. 28, n. 4, p. 1149-1165, jan. 2015b. Disponível em: DOI: 10.1007/s00477-015-1021-9. Acesso: 01 set. 2020.

_____; JONES, S.; SHABANI, F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. **Catena**, n. 175, p. 174-192, 2019. TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1993.

YALCIN, G.; AKYUREK, Z. Analysing flood vulnerable areas with multicriteria evaluation. In. ISPRS CONGRESS, 20., 2004, , Istanbul. **Proceedings...** Istanbul-Turkey: ISPRS, 2004. p. 359-364.

ZEE – Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Disponível em: <http://zee.df.gov.br/dados-espaciais/> Acesso: 14 set. 2020.