

Modelagem espacial da vulnerabilidade à inundação no município de Marabá-PA via lógica Fuzzy

Spatial modeling of vulnerability to flooding in the municipality of Marabá-PA via fuzzy logic

Paulo Eduardo Silva Bezerra¹
Francisco Carlos Lira Pessoa²
David Figueiredo Ferreira Junior³

Resumo

As inundações afetam pessoas em todo o mundo e, no Brasil, a ocorrência desses eventos vem aumentando principalmente em áreas urbanas, resultando em danos imediatos ao meio ambiente, bem como atingindo diretamente a população, independente da sua condição social e econômica. De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais, o estado do Pará apresentou 256 ocorrências de inundação no período de 1991 a 2012. Logo, o objetivo desta pesquisa foi mapear o município de Marabá-PA em relação às suas áreas suscetíveis à inundação, utilizando-se nove variáveis de entrada - Altitude, Curvatura, Declividade, SPI, TWI, Distâncias Dos Rios, Pedologia, Precipitação E Uso E Cobertura Do Solo - por meio da Lógica Fuzzy e Técnicas de Geoprocessamento nos períodos de maiores e menores precipitação. A escolha da área de estudo se deve ao fato de Marabá ser o município que apresentou o maior número de ocorrências de inundações no estado do Pará e também devido a poucas informações e estudos sobre o meio físico a temas relacionados à inundação na Região Amazônica. Os resultados encontrados mostraram que a maior parte da vulnerabilidade à inundação está localizada na área urbana do território em estudo, correspondendo a 1011,69 km², no período de maior precipitação. Portanto, o mapa de vulnerabilidade à inundação pode ser utilizado pelos órgãos públicos com uma ferramenta de gestão ambiental e no auxílio na tomada de decisão com a finalidade de minimizar os impactos econômicos e sociais.

Palavras-Chave: Escoamento Superficial; Geoprocessamento; Eventos Extremos.

Abstract

¹ Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA) pauloeduardoea@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5424-6012>

² Docente da Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA) fclpessoa@ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6496-9043>

³ Discente de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará (UFPA) davydferreira@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0933-0351>

Floods affect people all over the world and, in Brazil, the occurrence of these events has been increasing mainly in urban areas, resulting in immediate damage to the environment, as well as directly affecting the population, regardless of their social and economic status. According to the Brazilian Atlas of Natural Disasters, the state of Pará had 256 flood events between 1991 and 2012. Therefore, the aim of this research is to map the municipality of Marabá-PA in relation to its areas susceptible to flooding, using nine input variables - Altitude, Curvature, Declivity, SPI, TWI, River Distances, Pedology, Precipitation and Land Use and Cover - by means of Fuzzy Logic and Geoprocessing Techniques in the periods of highest and lowest precipitation. The study area was chosen because Marabá is the municipality with the highest number of flood events in the state of Pará and also because there is little information and studies on the physical environment and flood-related issues in the Amazon Region. The results showed that most of the vulnerability to flooding is located in the urban area of the territory under study, corresponding to 1011.69 km², during the period of highest rainfall. Therefore, the flood vulnerability map can be used by public bodies as an environmental management tool and to aid decision-making in order to minimize economic and social impacts.

Keywords: Surface runoff; Geoprocessing; Extreme Events.

Introdução

As inundações são eventos naturais ocorridos nos corpos d'água. Sua magnitude e frequência estão diretamente relacionadas com a intensidade e a distribuição da precipitação, a infiltração, o grau de saturação, as características morfométricas e morfológicas da bacia de drenagem (TOMINAGA et al., 2009). Segundo Sausen e Narvaes (2015), as inundações estão entre os desastres naturais mais devastadores que causam danos imensuráveis.

Este evento é o que mais afeta pessoas em todo o mundo e sua ocorrência vem aumentando no Brasil, e por ser considerado um fenômeno natural e/ou antrópico, pode resultar em danos imediatos ao meio ambiente, bem como prejuízos a população, independente da sua condição social e econômica (SAUSEN; NARVAES, 2015; REIS; SANTOS; MATOS, 2014). Em áreas urbanas brasileiras, acontecimentos de inundações aumentaram notavelmente nas últimas décadas, em razão de fatores como: crescimento urbano, áreas impermeáveis e ocupação urbana desordenada - ocupação do leito de inundações (PEGADO et al., 2014; OZKAN; TARHAN, 2016).

Conforme dados do último Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2013), no estado do Pará, ocorreram 256 registros oficiais de inundações no período de 1991 a 2012, as quais

afetaram mais de 600 mil pessoas. As maiores incidências deram-se no ano de 2009, mais precisamente nos meses de março e abril, em virtude das altas taxas pluviométricas da região (DOURADO; ANDRADE; CARNEIRO, 2017; CEPED, 2013).

De acordo com Lee et al. (2018), os fenômenos das inundações são condicionados por muitos fatores, tais como clima, litologia, topografia, pedologia, morfologia, meteorologia, ação antrópica, entre outros. Tais eventos tem afetado muito a Região Amazônica nos últimos anos (SILVA JÚNIOR; SZLAFSZTEIN, 2010), sendo responsável por 59% dos desastres naturais ocorridos no país, representando cerca de 72% das perdas econômicas em todo o mundo (SAUSEN; NARVAES, 2015).

Fundamentado nisso, é primordial a implantação de um sistema de monitoramento, o qual permita alertar a população de possíveis desastres. Segundo Londe e outros (2014), no Brasil, o monitoramento de inundação é realizado pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico – ANA, pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais – CPRM e pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas e Desastres Naturais – CEMADEM, as quais aplicam algumas técnicas de modelagem e geoprocessamento para prever esses eventos.

Nesse contexto, algumas pesquisas vêm sendo elaboradas por meio de Técnicas de Geoprocessamento, visando analisar e/ou identificar localidades com suscetibilidade a inundações, a exemplo do município de Toronto no Canadá (RINCON; KHAN; ARMENAKIS, 2018), Beijing na China (CAO et al., 2016), a região do Rio Grande do Sul (MARTH; MOURA; KOESTER, 2016), Porto Nacional em Tocantins (PEREIRA; CRISTO, 2018) e Viçosa em Minas Gerais (AMARAL; REIS, 2017). No município de Santarém-PA, Dourado, Andrade e Carneiro (2017) utilizaram a Lógica Fuzzy inseridas em um ambiente do Sistema de Informação Geográfica (SIG) para a geração de mapas de áreas passíveis de inundação.

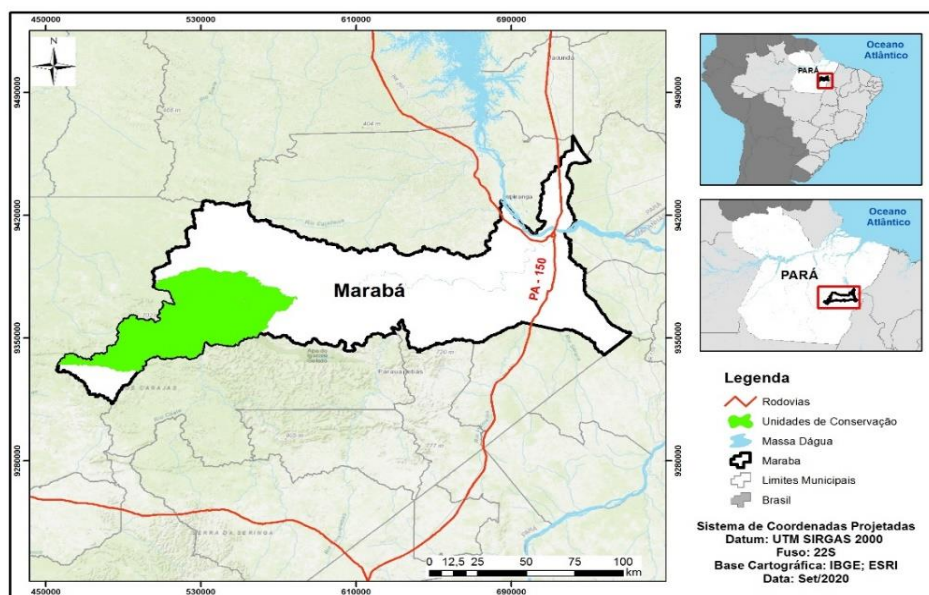
O município de Marabá, localizado no estado do Pará, foi o que registrou o maior número de ocorrência de inundações no período de 1991 a 2012 (UFSC, 2013). Posto isso, o objetivo desta pesquisa foi desenvolver um mapeamento de áreas suscetíveis à inundações no município de Marabá-PA, por intermédio da Lógica Fuzzy e de técnicas de geoprocessamento, visando auxiliar na

tomada de decisão dos órgãos públicos, da mesma maneira que alertar a sociedade civil e a comunidade científica acerca desta problemática.

Área de Estudo

O município de Marabá localiza-se no Sudeste do Pará, em confluência com dois rios, o Itacaúnas e o Tocantins (Figura 1), a uma distância de 475 km do município de Belém, possuindo uma extensão territorial 15.157,90 km² e população de 275.086 habitantes. Sua densidade demográfica é de 18,18 habitantes/km², sendo o quarto município mais populoso do estado do Pará (IBGE, 2010).

Figura 1 - Mapa de Localização da área de estudo.



Elaborado pelos autores.

Marabá possui clima tropical - a classificação de clima é Aw, segundo Koppen, com precipitação média em torno de 2200 mm e uma temperatura média do ar de 26°C. A pedologia da área de estudo é caracterizada pelas classes Gleissolo, Neossolo, Latossolo e Argissolo (EMBRAPA, 2011). Na cobertura vegetal do município, há uma predominância da Floresta Densa, Florestas Ciliares e Mata de Galeria. Também é notada a presença da vegetação secundária em áreas de terra firme, principalmente da atividade pecuária na região. Em contrapartida, a geologia é

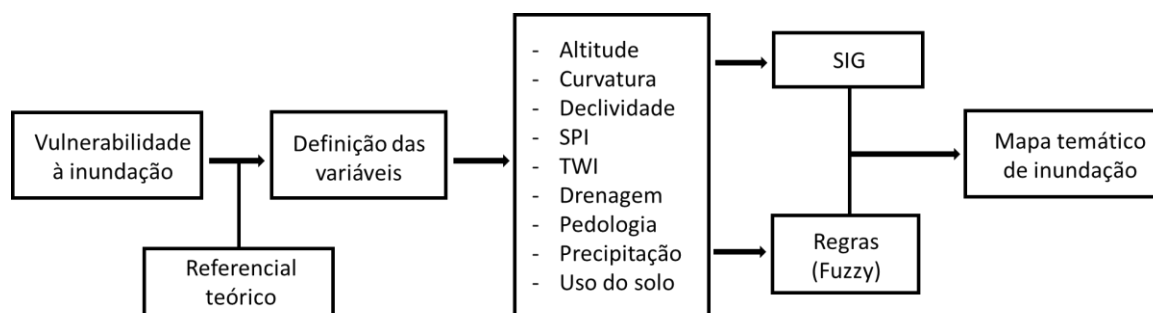
constituída por rochas de idade Pré-Cambriana do Complexo Xingu, Grupo Tocantins, formações Ferríferas e formação Rio Fresco (FAPESPA, 2016).

Metodologia

Construção do mapa de suscetibilidade de áreas de inundações

A modelagem da suscetibilidade à áreas inundadas em Marabá foi executada por meio da Lógica Fuzzy em ambiente SIG. Foram utilizadas 9 variáveis de entrada na aplicação do método, as quais estão diretamente relacionadas com os fatores condicionantes a suscetibilidade à inundação. Foram estabelecidas aproximadamente sessenta mil regras, por meio da inferência Fuzzy, em seguida, foi elaborado um mapa que permitiu identificar as áreas mais suscetíveis à inundações no município. A presente pesquisa obedeceu ao esquema metodológico a seguir (Figura 2).

Figura 2 – Esquema metodológico para a elaboração do mapa de suscetibilidade a inundações.



Elaborado pelos autores.

Dados de entrada no modelo

Como variáveis de entrada na Modelagem Fuzzy, foram utilizadas a Altimetria, a Curvatura, a Declividade, o Índice de Potência de Fluxo – SPI, o Índice de Umidade Topográfica – TWI, a Distâncias dos Rios, a Pedologia, a Precipitação e o Uso e Cobertura do Solo, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis utilizadas para a análise da Vulnerabilidade à Inundação.

Variáveis	Justificativa	Referência
Altitude	Áreas com menores elevações estão sujeitas à inundação.	CAO et al. (2016); HONG et al. (2018)
Curvatura	Diretamente relacionada ao escoamento superficial e infiltração.	CAO et al. (2016)
Declividade	É avaliada como bom indicador de suscetibilidade a áreas inundadas. Está diretamente relacionada a infiltração e ao escoamento superficial.	LEE et al. (2018); PACHAURI; PANT (1992); NEFESLIOGLU et al. (2010)
Índ. de potência de fluxo – SPI	Áreas com alto declive e acumulação de fluxo, identificando áreas com alto potencial erosivo.	REGMI et al. (2014)
Índ. de umidade topográfica – TWI	É uns dos principais fatores que contribui para a inundação e está diretamente relacionado ao acúmulo de fluxo de uma determinada área.	AHMAD-AZANI, YUSOFF; KU-MAHAMUD (2018); PRATTES et al. (2012); LIN et al. (2006)
Distância de Drenagem	Áreas com maior densidade de drenagem são mais suscetíveis à inundação.	COSTA et al. (2018); HONG et al. (2018)
Pedologia	Está relacionada com a taxa de percolação, e o grau de saturação do solo está diretamente ligado à inundação.	MARTH; MOURA; KOESTER (2016)
Precipitação	O volume e a intensidade da precipitação é uma das principais condições para a ocorrência da inundação.	ANDRADE; FERREIRA; SILVA (2014); SILVEIRA; SARTORI (2010)
Uso do Solo	Tem papel significativo na análise de áreas de inundações, devido ao seu impacto nos componentes dos processos hidrológicos, tais como infiltração e escoamento superficial.	RAHMATI; POURGHASEMI; ZEINIVAND (2016)

Elaborado pelos autores.

Aquisição e processamento dos dados

Os parâmetros topográficos como: Altitude, Declividade, Curvatura, SPI e TWI, foram extraídos a partir das imagens de radar *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de resolução espacial de 30 metros e escala de 1:250.000, disponíveis no sistema online do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Para produzir o mapa hipsométrico (Altitude), foram extraídas as Curvas de Nível, o que permitiu a elaboração do Mapa de Elevação da área de estudo. A declividade foi quantificada em

porcentagem, e a Curvatura foi classificada em três classes: a convexa (indica valores positivos), a côncava (valores negativos) e a retilínea (valores próximos de zero) (CAO et al., 2016).

O índice do SPI descreve o potencial da topografia em concentrar alta quantidade de águas superficiais (CAPOANE, 2015), e pode ser calculado conforme equação 1.

$$SPI=A_s \times \tan \beta \quad (1)$$

Em que A_s é a Área Específica (m^2/m) e β o Gradiente de Inclinação em graus.

O índice TWI é calculado em função do declive e da quantidade de água a montante, a partir dos dados da SRTM, conforme equação 2.

$$TWI=\ln (A_s/\tan \beta) \quad (2)$$

Em que A_s é a Área Específica e β é o Declive. Os maiores valores de TWI localizam-se em áreas planas, apresentando maior acumulação de água, enquanto os menores valores em áreas com alto declive e menor potencial de acúmulo de água (DA SILVA, 2017).

As informações de pedologia foram obtidas na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, e os dados de Hidrografia no site da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico - ANA.

Para a análise do Uso e Cobertura do Solo, utilizou-se imagens do satélite Landsat 8 sensor OLI (Operation Land Imager) das seguintes órbitas ponto 223/64, 224/64 e 224/65, com resolução espacial de 30 metros e composição colorida R65GB4, disponibilizado pelo serviço geológico americano (UNITES STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS).

Dessa forma, 6 classes de Usos do Solo foram estabelecidas: Área Urbana, Corpo Hídrico, Floresta, Mineração, Solo Exposto e Vegetação Secundária, visando a utilização do software *Ecognition Developer 64*. A identificação e quantificação destes dados foram realizadas por meio

da Técnica de Segmentação, o que permitiu agrupar os *pixels* de cada objeto em função dos parâmetros forma, cor, escala e suavidade (SCHULTZ et al., 2016).

Dados do *Global Precipitation Climatology Center* (GPCC) foram utilizados para quantificar a Precipitação, tendo como base uma série histórica de 40 anos (1982 a 2022). Os meses de dezembro a maio foram considerados como período chuvoso, e os meses junho a novembro como período menos chuvoso, conforme estudos de Menezes, Fernandes e Rocha (2015). O GPCC fornece informações em grade (0,5° x 0,5°) e possui dados de todo o globo terrestre (SCHENEIDER, 2014). De acordo com Limberger e Silva (2018), na Amazônia, os dados do GPCC são os que se aproximam mais dos dados das estações pluviométricas administradas pela ANA.

O método de Interpolação da Inversa Distância Ponderada (IDW) foi utilizado para especializar os dados de precipitação obtidos do GPCC. O IDW utiliza uma combinação linear ponderada, sendo recomendado quando os pontos estão distribuídos uniformemente (SHAHID; LQBAL; KHAN, 2017).

Definição das regras e construção do modelo

Na inferência difusa, as variáveis de entrada são a base para a construção das regras Fuzzy, as quais definem os valores ou restrições na tomada de decisões (PICANÇO JR et al. 2014). Sendo assim, cada variável passou por um processo de padronização para equalizar os resultados e ter uma distribuição uniforme. Em seguida, para cada um dos critérios, foram definidos os Graus de Pertinência em relação a cada regra da inferência Fuzzy, conforme exposto na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de suscetibilidade das classes de Pedologia e Usos do Solo

Pedologia	Justificativa	Peso
Argissolo	Boa capacidade de armazenamento de água, são bem desenvolvidos, profundo e boa drenagem	1
Gleissolo	Possui característica de má drenagem	10

Latosolo	Solo bem desenvolvido, profundo e bem drenado	1
Neossolo Litólico	São solos de baixa profundidade e pequena capacidade de armazenamento de água	10
Usos do Solo	Justificativa	Peso
Água	O excedente dos corpos d'água está diretamente relacionada com a inundação	10
Área Desmatada	Influência diretamente na capacidade de infiltração da água e no escoamento superficial	8
Área Urbana	Escoamento superficial é bastante alto em áreas urbanas	10
Floresta secundária	Redução da retenção da água da chuva e aumento do escoamento superficial	3
Floresta Densa	Reduz o impacto da chuva no solo, reduz a erosão e diminui a velocidade de escoamento	1

Fonte: Adaptado de Silva et al (2012); Andrade; Ferreira e Silva (2014).

O grau de pertinência é uma função que pode assumir valores no intervalo de [0,1], assim é possível que uma variável linguística assuma valores de baixa, média e alta vulnerabilidade à inundação (GONÇALVES, 2007).

As variáveis de Pedologia e de Usos do Solo (Tabela 3) foram reclassificadas, uma vez que não apresentavam valores numéricos, permitindo definir os Graus de Vulnerabilidade para cada variável de entrada, o que pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Grau de Vulnerabilidade das classes de Pedologia e de Usos do Solo

Altitude		Curvatura		Distância de Drenagem	
< 150 m	Alto	Convexa	Baixo	0 – 200 m	Alto
150 - 300 m	Moderado	Retilínea	Alto	200 – 500 m	Moderado
> 300 m	Baixo	Côncava	Alto	> 500 m	Baixo
Declividade (%)		SPI		TWI	
Plano (0-3)	Alto	< 0	Baixo	<4	Baixo
Suave ondulado (3-8)	Alto	0 – 10	Moderado	4 – 7	Moderado
Ondulado (8-20)	Moderado	> 10	Alto	>7	Alto
Forte ondulado (20-45)	Baixo				
Montanhoso (> 45)	Baixo				
Usos do Solo		Precipitação (mm/mês)		Pedologia	

Água	Alto	<50 mm	Baixo	Argissolo	Baixo
Área Desmatada	Alto	50 – 100 mm	Moderado	Gleissolo	Alto
Área Urbana	Alto	>100 mm	Alto	Latossolo	Baixo
Floresta secundária	Moderado			Neossolo	Moderado
Floresta densa	Baixo				

Fonte: Adaptado de Lee (2018); Ahmad-Azani, Yusoff e Ku-Mahamud (2018); Rodrigues (2017); Andrade; Ferreira e Silva (2014); Silva et al (2012), EMBRAPA (2011).

Após a definição das variáveis e seus respectivos Graus de Pertinência (Tabela 4), foi possível criar as regras Fuzzy no ambiente do software *Matlab 2015*. O método utilizado nessa pesquisa foi o FIS Mamdani (Lógica Fuzzy), o qual consiste em 4 etapas: a *Fuzzyficação*, que determina o Grau de pertinência para cada variável de entrada com base na opinião de um ou mais especialistas e na literatura; a *Avaliação das regras Fuzzy*, nesta etapa as entradas *Fuzzyficadas* são aplicadas em todas as variáveis visando obter o valor de cada regra; a *Agregação das regras Fuzzy*, onde todas as regras foram agregadas em um único conjunto Fuzzy; e a *Defuzzyficação*, que é a etapa de obtenção dos resultados - saída numérica (PICANÇO JR et al. 2014).

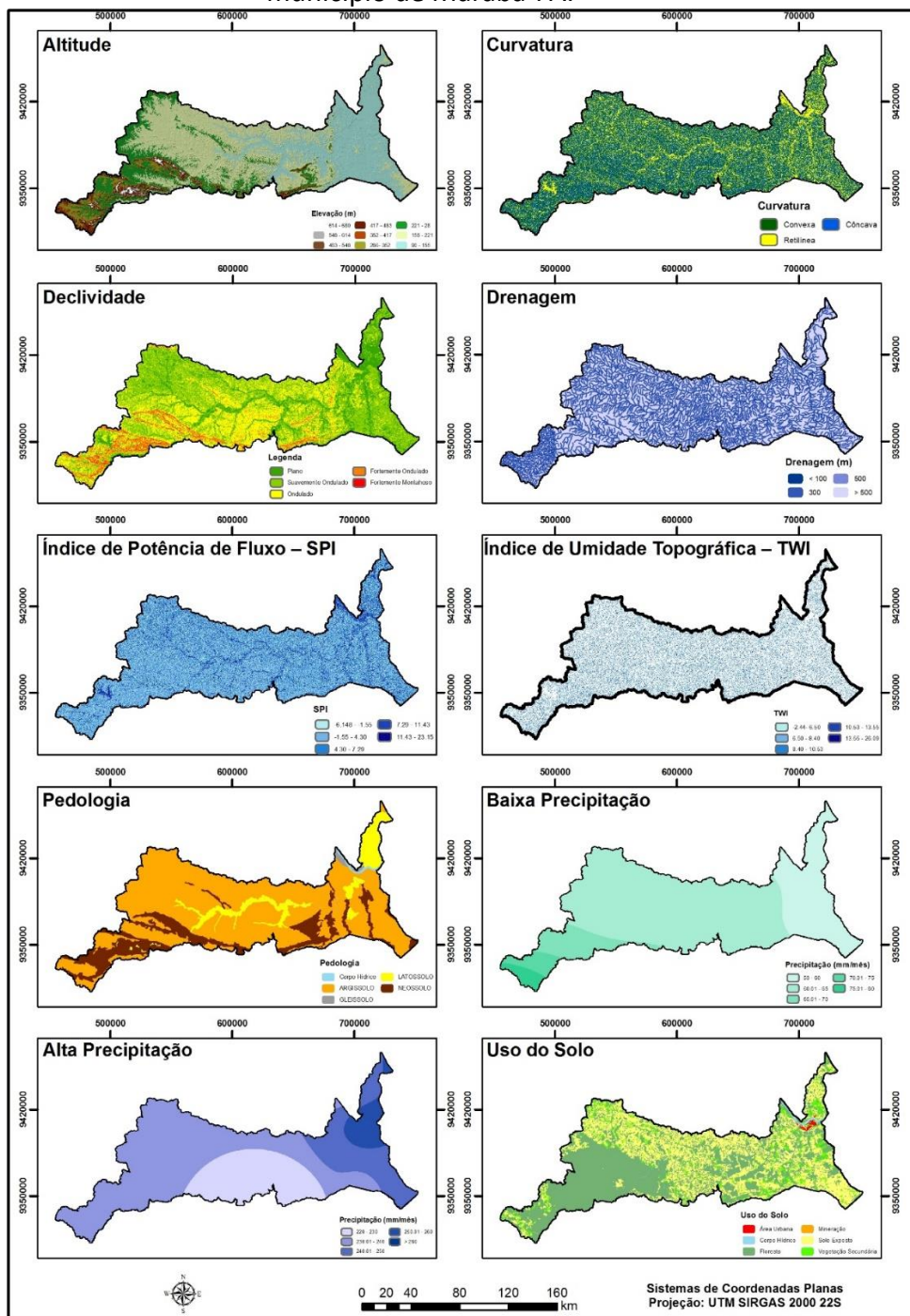
Neste trabalho foi utilizada a mesma metodologia do estudo de Ahmad-Azani, Yusoff e Ku-Mahamud (2018). As regras foram descritas apenas usando a opinião de especialistas e da literatura, permitindo categorizar os resultados de como muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta.

Para a elaboração dos mapas de vulnerabilidade à inundação no município de Marabá-PA foi utilizado o *software* ArcGis 10.5 e a projeção sirgas 2000 UTM 22S.

Resultados e Discussão

A figura 3 apresenta os resultados obtidos com o processamento dos dados de entrada (variáveis) do modelo Fuzzy, os quais permitiram a elaboração do mapa de vulnerabilidade à inundação na área de estudo.

Figura 3 - Variáveis utilizadas para a modelagem e mapeamento da Vulnerabilidade à Inundação no município de Marabá-PA.



Elaborado pelos autores.

Com os resultados das 9 variáveis é possível observar que a Altitude apresentou uma variação entre 90 e 680 metros, no que se refere a Curvatura, 36,56% (5.528,33 Km²) da área do município de Marabá foi classificada como Convexa, e 27,70% (4.189,25 Km²) e 35,74% (5.405,21 Km²) Retilínea e Côncava, respectivamente.

A Declividade do município, apresenta cerca de 60% de áreas planas e suavemente onduladas. Com respeito ao critério de Drenagem, nota-se a presença de muitos corpos hídricos na região. Vale ressaltar que áreas próximas de corpos hídricos são mais vulneráveis à inundações, principalmente em áreas urbanas e planas.

No índice de Potência de Fluxo – SPI, que indica áreas com potencial de ocorrência de erosão (REGMI et al., 2014), a maior parte do município de Marabá está concentrada no intervalo de 0 – 10, o que indica um potencial erosivo mediano, representando cerca de 67,65% da área total.

Em relação ao índice do TWI, relacionado ao acúmulo de água (AHMAD-AZANI; YUSOFF; KU-MAHAMUD, 2018), cerca de 75% da área total apresentou valores maiores que 7, o que indica áreas propícias ao acúmulo de águas. Quanto a Pedologia, o solo Argissolo é predominante, representando aproximadamente 72% da área total do município. As classes de solo Gleissolo e Neossolo, que apresentam peso máximo para a ocorrência de inundação, representaram cerca de 18% da área total de Marabá.

Quanto a Precipitação, detectou-se que no período menos chuvoso houve uma variação de 50 a 82 mm/mês, e no período mais chuvoso uma variação de 220 a 270 mm/mês. A falta de planejamento urbano, principalmente as ocupações irregulares nos leitos dos rios, conciliado com chuvas intensas aumentam consideravelmente a probabilidade de ocorrer o fenômeno da inundação (FREIRE, BONFIM e NATENZON, 2014).

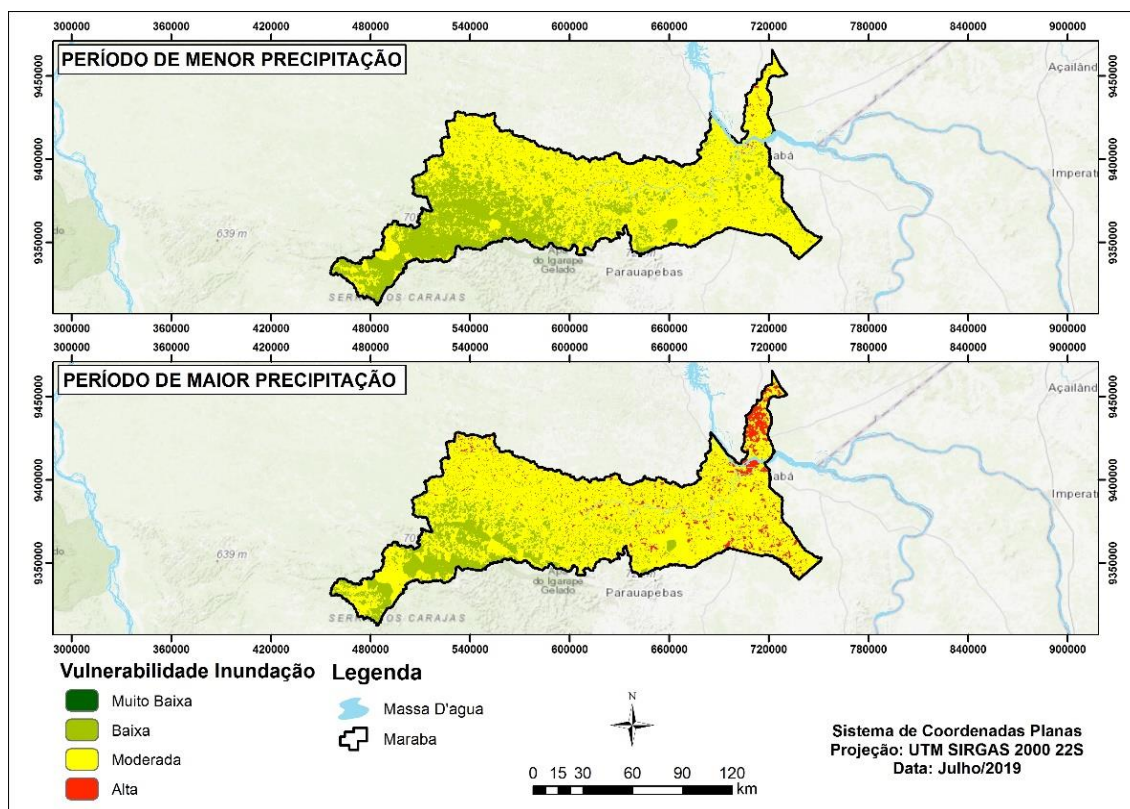
No que diz respeito aos Usos do Solo, as classes Floresta e Solo Exposto são as mais presentes na área de estudo, com 52,49% (7.891,58 Km²) e 38,49% (5.819,55 Km²), respectivamente. A grande predominância da classe Floresta é resultando, principalmente, da presença de cinco unidades de conservação no município de Marabá. A área urbana, localizada ao

nordeste do município, apresentou uma extensão territorial de 44,67 km², correspondendo a 0,3% da área total. As outras classes de Usos do Solo encontrados em Marabá são de Vegetação Secundária, de Mineração e Hidrografia, representando 8,29%, 0,02% e 0,72% da área total, respectivamente.

Vulnerabilidade à inundação

O mapa de Vulnerabilidade à Inundação apresenta quatro classes, as quais variaram de Muito Baixa à Alta Vulnerabilidade. Observa-se na Figura 4, que para o período chuvoso, cerca de 6,69% (1,011,85 Km²) da área total do município apresenta Alta Vulnerabilidade à Inundação, com relação ao período menos chuvoso, a vulnerabilidade é alta em 1% (150,61 Km²) da área.

Figura 4 - Mapa de Vulnerabilidade à Inundação no município de Marabá-PA.



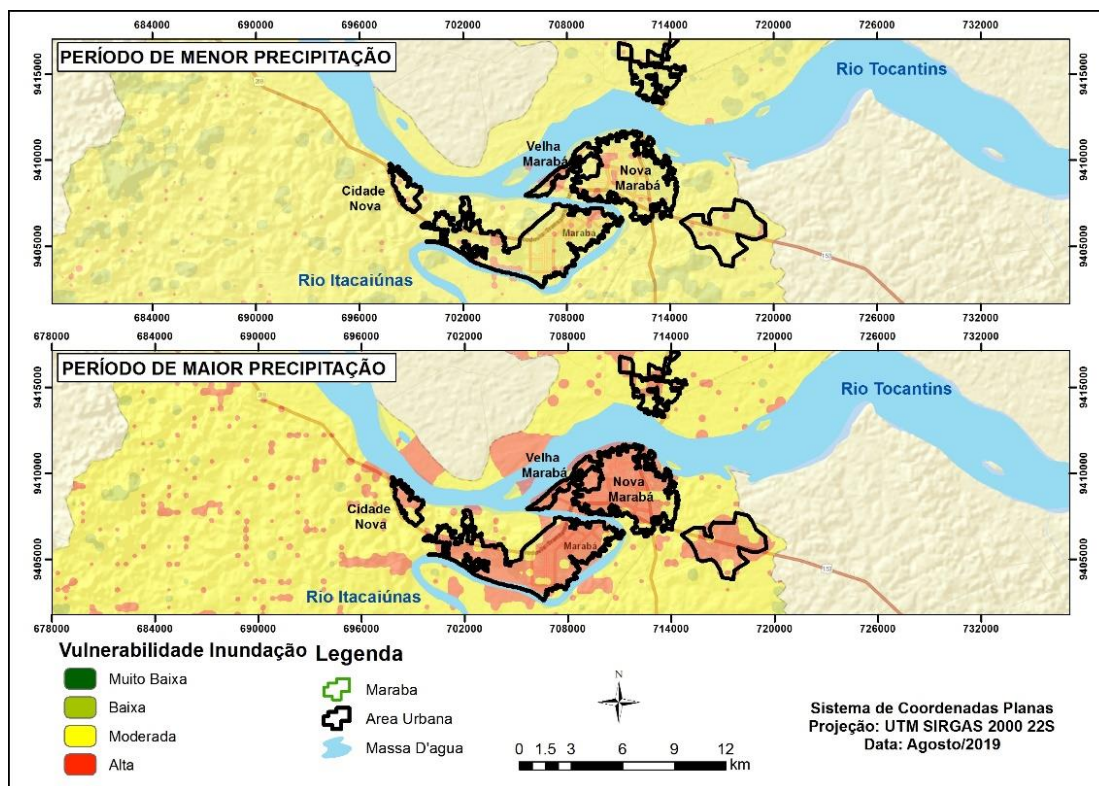
Elaborado pelos autores.

A classe Moderada Vulnerabilidade à Inundação apresentou uma maior representatividade em Marabá, com 66,83% (10.107,42 Km²) da área no período menos chuvoso e de 76,97% (11.639,92 Km²) no período mais chuvoso.

As classes de Vulnerabilidade à Inundação Muito Baixa e Baixa, representam juntas em torno de 32,39% da área total no período menos chuvoso e de 16,47% no período mais chuvoso. Essas áreas estão localizadas a oeste do município, onde se encontram as Unidades de Conservação (Figura 4), com grande presença de vegetação. Segundo Andrade, Ferreira e Silva (2014), a presença da cobertura vegetal ameniza o impacto da chuva e diminui a velocidade de escoamento, fazendo com que a água da chuva não chegue nas calhas dos rios, fato que provoca a inundação. Cabe destacar que a variável Vulnerabilidade Muito Alta não foi encontrada nos resultados obtidos por essa pesquisa.

Nesse sentido, vale enfatizar que a área urbana do município de Marabá está localizada exatamente nas regiões que apresentaram Alta Vulnerabilidade à Inundação, tanto no período menos chuvoso e principalmente no período mais chuvoso. Essa informação pode ser observada no Mapa de Vulnerabilidade à Inundação na área urbana do município (Figura 5). A área urbana de Marabá é composta por três grandes bairros, a citar: Nova Marabá, Velha Marabá e Cidade Nova.

Figura 5 - Mapa de Vulnerabilidade à Inundação na área urbana do município de Marabá-PA.



Elaborado pelos autores.

De acordo com a pesquisa realizada por Almeida (2011), a Localização e a Topografia do município de Marabá não apresentavam condições favoráveis para a construção de aglomerados urbanos. A cidade de Marabá está situada entre os rios Atacanhas e Tocantins, o que permite afirmar que a mesma local é suscetível para a ocorrência à Inundação.

De acordo com Tucci e Bertoni (2003), as inundações ocorrem em virtude da intensidade da precipitação e pela quantidade de água ser superior à capacidade de drenagem. Esse processo é também acentuado devido à ocupação urbana, que aumenta assim a área impermeabilizada, fazendo com que se acentue o pico de vazão em um pequeno espaço de tempo.

Além das variáveis utilizadas na pesquisa, é importante considerar as ocorrências das cheias na região. De acordo com a Defesa Civil, o nível de alerta da cheia do rio Tocantins é de 10 metros, dados fornecidos pelo Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE) a partir

do ano de 1972, sendo que nos anos e 1978, 1979, 1980 e 1990 as cheias foram superiores a 14 metros, com destaque para o ano de 1980 com 17,42 metros. Em apenas cinco anos, o nível de alerta de 10 metros não foi ultrapassado, referentes aos anos de 1972, 1976, 1996, 1998 e 1999 (CÂMARA et al., 2016).

Os períodos das maiores cheias, com valores superiores a 14 m, apresentaram níveis de: 14,47 m (1978), 14,45 m (1979), 17,42 m (1980) e 14,40 m (1990) (CÂMARA et al., 2016). É importante ressaltar que, em épocas de cheias, dezembro a abril, acontecem as maiores incidências de inundação na cidade (ALMEIDA, 2011).

O bairro da Cidade Velha, devido à proximidade ao rio Tocantins, está mais vulnerável à inundações, principalmente em época de cheias. Por isso, na década de 1970, começou a ser construída a área urbana de Nova Marabá, como forma de abrigo para os moradores em época de cheias na cidade. No entanto, em função do crescimento urbano desordenado nas décadas de 1980 e 1990, o problema de alagamentos se intensificou no município (ALMEIDA, 2011), como mostra a Figura 6, em que toda a área urbana está vulnerável à inundações.

No ano de 2005, a prefeitura do município construiu 150 casas com o intuito de transferir as pessoas em áreas inundáveis, também foram construídas diversas obras de drenagem para evitar a inundação e o deslizamento de terra em decorrência da precipitação na região (RAIOL, 2009).

Considerações Finais

A metodologia utilizada na pesquisa permitiu analisar as áreas que estão Suscetíveis à Inundações no município de Marabá-PA nos períodos chuvoso e menos chuvoso, por intermédio de técnicas de geoprocessamento e Lógica Fuzzy, levando em consideração fatores ambientais diretamente relacionadas ao fenômeno da inundação e do escoamento superficial.

No período chuvoso, detectou-se que os maiores índices de Vulnerabilidade à Inundação estão localizados no nordeste do município de Marabá, mais precisamente na área urbana, o que

representa uma área de 1.011,65 km². Essas ocorrências são maiores ainda nos meses de março, abril e maio, devido ao alto volume pluviométrico na região.

Além disso, as variáveis de Usos do Solo e Precipitação são de grande relevância na geração do modelo para identificar áreas Vulneráveis à Inundação. As áreas com menores graus de vulnerabilidade estão localizadas em área de Unidades de Conservação, por conta da grande presença de vegetação nessas áreas protegidas.

Em relação ao período menos chuvoso, houve uma diminuição no grau de Vulnerabilidade à Inundação, apresentando uma área de 150,61 km² em relação a área total do município, ressaltando a importância da precipitação na análise. No entanto, apesar de o modelo utilizado na pesquisa ser eficaz, é preciso analisar outros fatores que podem afetar esse grau de vulnerabilidade, como em épocas de cheias do rio Tocantins, que agrava consideravelmente o risco de inundação na região.

Portanto, o Mapa de Vulnerabilidade à Inundação pode ser utilizado pelos órgãos públicos como uma ferramenta de Gestão Ambiental e no auxílio na tomada de decisão com a finalidade de minimizar os impactos econômicos e sociais no município. A abordagem apresentada na pesquisa também poderá ser útil para o Planejamento Urbano dos municípios à medida que pode indicar áreas vulneráveis as quais não poderão ser apropriadas para a alocação de pessoas e construções urbanas.

Referências

- ABRAMOVAY, R. **Paradigmas do capitalismo agrário em questão**. São Paulo: Hucitec, 1992.
- AHMAD-AZANI, N.I.; YUSOFF, N.; KU-MAHAMUD, K.R. Fuzzy Discretization Technique for Bayesian Flood Disaster Model. **Journal of ICT**, vol.18, n. 2, p.167-189, 2018.
- ALMEIDA, J. J. Os riscos naturais e a história: O caso das enchentes em Marabá (Pa). **Tempos Históricos**, vol. 15, n. 2, p. 205-238, 2011.
- AMARAL, C.M.; REIS, C.H. Suscetibilidade a escorregamentos e inundações: hierarquização dos graus de riscos na área urbana de Viçosa-MG. **Revista da ANPEGE**, vol.13, n.21, p. 199-219, 2017.
- ANDRADE, S.L.; DE OLIVEIRA FERREIRA, V.; SILVA, M.M. Elaboração de um mapa de risco de inundação da bacia hidrográfica do córrego São Pedro, área urbana de Uberlândia-MG/Elab. of a

inund. risk map of the watershed of the stream St. Pedro, urban area of Uberlândia-MG. **Caderno de Geografia**, vol.24, n. 41, p.1-16, 2014.

BRASIL. Ministério da Fazenda. Secretaria de Acompanhamento Econômico. **Parecer técnico nº 06370/2006/RJ**. Rio de Janeiro: Ministério da Fazenda, 13 set. 2006. Disponível em: <http://www.cade.gov.br/Plenario/Sessao_386/Pareceres/ParecerSeae-AC-2006-08012.008423-International_BusIne_MachIne.PDF>. Acesso: 4 abril 2023.

CÂMARA, R. K. C.; ROCHA, E. J. P.; PROTÁZIO, J. M. B.; QUEIROZ, J. C.; DO NASCIMENTO RIBEIRO, W. M.; SIQUEIRA, I. S.; e DE LIMA, A. M. M. Modelagem Hidrológica Estocástica Aplicada ao Rio Tocantins para a Cidade de Marabá-PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 31, n.1, São Paulo, Jan./Mar, 2016.

CAO, C.; XU, P.; WANG, Y.; CHEN, J.; ZHENG, L.; NIU, C. Flash flood hazard susceptibility mapping using frequency ratio and statistical index methods in coalmine subsidence areas. **Sustainability**, vol.8, n. 9, p. 948, 2016.

CAPOANE, V. Determinação do índice de potência de escoamento para o município de Palmitinho/RS utilizando modelos digitais de elevação. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, vol. 13, n. 2, p. 106-117, 2015.

CEPED, U. F. S. C. **Atlas brasileiro de desastres naturais: 1991 a 2012**. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

DA SILVA, J. F. de O. Aplicação da análise multicritério para a definição de áreas de risco de transmissão de malária na província de Luanda, Angola. Tese de Doutorado. Universidade do Porto (Portugal), 2017.

DOURADO, F.F.; DE ANDRADE, M.M.N., CARNEIRO, C.D.C. Geração de mapas de riscos naturais em Santarém-PA: abordagem baseada na Lógica Fuzzy. **Revista Geociências**, vol.36, n.3, p. 579-587, 2018.

FAPESPA. FUNDAÇÃO AMAZÔNIA DE AMPARO A ESTUDOS E PESQUISAS. **Estatísticas Municipais Paraenses: Marabá**. Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação – Belém. 2016.

FERNANDES, B. M. Agronegócio nas Américas: o mito do desenvolvimento e a resistência do campesinato. In: Encontro de Geógrafos da América Latina, 10, 2005, São Paulo, 2005. **Anais [...]** São Paulo: EGAL/USP, 2005. p.4860-4874.

FREIRE, N. C. F.; BONFIM, C. V. D.; NATENZON, C. E. Vulnerabilidade socioambiental, inundações e repercussões na Saúde em regiões periféricas: o caso de Alagoas, Brasil. **Ciência e Saúde Coletiva**, vol. 19, p. 3755-3762, 2014.

GONÇALVES, A. P. Aplicação de lógica fuzzy em guerra eletrônica. Instituto Tecnológico da Aeronáutica. 2007. Disponível em: <https://www.sige.ita.br/edicoes-antteriores/2007/st/AO_07.pdf>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. RADAMBRASIL. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <ftp://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/>. Acesso em: 28 fev. 2023.

LEE, E. S.; LEE, D. K.; KIM, S. H.; LEE, K. C. Design strategies to reduce surface water flooding in a historical district. **Journal of Flood Risk Management**, vol. 11, p. 838-854, 2018.

LIN, H.S.; KOGELMANN, W.; WALKER, C.; BRUNS, M.A. Soil moisture patterns in a forested catchment: A hydrogeological perspective. **Geoderma**, vol. 131, p. 345-368, 2006.

LONDE, L.R.; COUTINHO, M.P.; DI GREGÓRIO, L.T.; SANTOS, L.B.L.; SORIANO, É. Desastres relacionados à água no Brasil: perspectivas e recomendações. **Revista Ambiente e Sociedade**, vol. 17, n. 4, 2014.

MARQUES, M. I. M. Lugar do modo de vida tradicional na modernidade. In: OLIVEIRA, A. U.; MARQUES, M. I. M. (org.). **O Campo no século XXI**. São Paulo: Casa Amarela, 2004, p. 145-158.

MARTH, J.D.; MOURA, N.S.V.; KOESTER, E. Estudo da suscetibilidade à inundação com base em análise geomorfológica, bacia hidrográfica do Arroio Santa Isabel, região costeira do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, São Paulo, vol. 37, n. 1, p. 13-28, 2016.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. da. O Uso da Estatística para Regionalização da Precipitação no Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 16, 2015.

MOUZINHO COSTA, C.; DUARTE DA SILVA, Q., DOS SANTOS COSTA, I. R., VALE BARROS, D.; CRUZ TEIXEIRA, E. Suscetibilidade a inundações a partir das variáveis morfométricas na região hidrográfica Eliezer Silva--alto curso do rio Paciência. **Entorno Geográfico**, n. 13, p. 68-81, 2017.

NEFESLIOGLU, H.A.; SEZER, E.; GOKCEOGLU, C.; BOZKIR, A.S.; DUMAN, T.Y. Assessment of landslide susceptibility by decision trees in the metropolitan area of Istanbul, Turkey. **Mathematical Problems in Engineering**, vol. 2010, p. 1-15, 2010.

OZKAN, S. P.; TARHAN, C. Detection of flood hazard in urban areas using GIS: Izmir case. **Procedia Technology**, vol. 22, p. 373-381, 2016.

PACHAURI, A.K.; PANT, M. Landslide hazard mapping based on geological attributes. **Engineering Geology**, vol. 32, p. 81-100, 1992.

PEGADO, R. S.; BLANCO, C. J. C.; ROHRIG, J.; CAROÇA, C.; COSTA, F. D. S. Risco de cheia e vulnerabilidade: uma abordagem às inundações urbanas de Belém/Pará/no Brasil. **Territorium**, vol. 21, p. 71-76, 2014.

PEREIRA, M. D. R.; CRISTO, S. S. V. Análise da Suscetibilidade a Inundação na Bacia Hidrográfica do Córrego São João, Porto Nacional-TO. **Revista Interface**, vol. 16, n. 16, p. 82-96, 2018.

PICANÇO JUNIOR, P. L.; SAROT, L. R.; DELAZARI, V. S.; ARAKI H. Determinação de níveis de segurança para a criminalidade no campus do centro politécnico da ufpr através da análise de dados geográficos por meio da lógica fuzzy. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais [...]**. Recife, 2014.

PRATES, V.; SOUZA, L. C. D. P., OLIVEIRA JUNIOR, J. C. Índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, vol. 16, n. 4, 2012.

RAHMATI, O.; POURGHASEMI, H.R.; ZEINIVAND, H. Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. **Geocarto International**, vol. 31, n. 1, p. 42-70, 2016.

RAIOL, J. de A. **Perspectivas para o meio ambiente urbano**: GEO Marabá. Pará, Belém:[sn], 2010.

REGMI, A.D.; DEVKOTA, K.C.; YOSHIDA, K.; PRADHAN, B.; POURGHASEMI, H.R.; KUMAMOTO, T.; AKGUN, A. Application of frequency ratio, statistical index, and weights-of-evidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. **Arabian Journal of Geosciences**, vol. 7, n. 2, p. 725-742, 2014.

REIS, R. K. G.; SANTOS, L. C. P., MATOS, J. A. Sistema de Alerta Contra Inundações Sensoriado (Sais) Para Comunidades Ribeirinhas No Amazonas Como Método De Prevenção Aos Riscos Das Cheias. **Revista GeoNorte**, p. 476-480, 2014.

RELPH, E. C. As bases fenomenológicas da Geografia. **Geografia**. vol.4, n 7, 1-25, abr. 1979.

RINCÓN, D.; KHAN, U.; ARMENAKIS, C. Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis: A Greater Toronto Area Case Study. **Geosciences**, vol. 8, n.8, p.275, 2018.

RODRIGUES, Sérgio Paulo Caetano. Aplicação de metodologias SIG à avaliação da perigosidade de inundação fluvial. 2017. Tese de Doutorado. Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/21360>>.

SAUSEN, T. M.; NARVAES, I. da S. **Sensoriamento Remoto para desastres**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

SCHNEIDER, U. et al. GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 115, n. 1-2, p. 15-40, 2014.

SCHULTZ, B.; FORMAGGIO, A.R.; EBERHARDT, I.D.R.; SANCHES, I.D.A.; OLIVEIRA, J.C.; LUIZ, A.J.B. Classificação orientada a objetos em imagens multitemporais Landsat aplicada na identificação de cana-de-açúcar e soja. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 68, n. 1, p. 131-143, 2016.

SHAHID, S. U. LQBAL, J. KHAN, S, J. A comprehensive assessment of spatial interpolation methods for the groundwater quality evaluation of Lahore, Punjab, Pakistan. **NUST Journal of Engineering Sciences**, vol. 10, n. 1, p. 1-13, 2017.

SILVA JÚNIOR, O.M; SZLAFSZTEIN, C.F. Análise de risco como critério a gestão do território: um estudo do plano diretor do município de Alenquer (PA). **Olam: Ciência e Tecnologia**, vol. 10, p. 1-29, 2010.

SILVA, A. B.; OLIVEIRA ACCIOLY, L.J.; GOMES, E.C.; SILVEIRA, H.L.F.; BARBOSA, G.M.N. Identificação e caracterização dos principais solos do município de Coruripe, Alagoas. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, vol. 17, n. 1, p. 59-65, 2012.

SILVEIRA, F. R. A recriação capitalista do campesinato (Os camponeses na região de Presidente Prudente). 1990. Tese (Doutorado em Geografia). FFLCH/USP, São Paulo. 1990.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais**. São Paulo: Editora Instituto Geológico, 2009.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Apostila de inundações urbanas da américa latina**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

USGS – United States Geological Survey. 2017. Imagens Landsat. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 de abril 2023.

VISHWANATH, V. H.; TOMASZEWSKI, B. M. Flood Hazard, Vulnerability, Risk Assessment for Uttarakhand State in India. In: ISCRAM. 2018.