

## **ANÁLISE HIERÁRQUICA APLICADA A RISCOS HIDROLÓGICOS: análise espaço-temporal de alagamento e inundação no município de Aracaju (SE)**

*Hierarchical analysis applied to hydrological risks: spatiotemporal analysis of flooding and inundation in the municipality of Aracaju (SE)*

Paulo Sergio de Rezende Nascimento<sup>1\*</sup>

Lenilson Santana Dinizio Junior<sup>2</sup>

### **RESUMO**

A topografia plana a levemente ondulada com influência direta das marés de sizígia são fatores facilitadores das inundações, no município de Aracaju, nos períodos de maior precipitação. Os alagamentos na área intensamente urbanizada são decorrentes, principalmente, da impermeabilização do solo e ineficiência do sistema de drenagem. A presente pesquisa apresenta cenários espaço-temporais das áreas inundadas e alagadas, em Aracaju, a partir de interpolações espaciais Distância Inversa Ponderada e Densidade de Kernel e da Análise Multicriterial Hierárquica, nos anos de 2021, 2022 e 2023. A modelagem constatou que mais de 50% do município está em situação de vulnerabilidade, sob o risco alto a muito alto nos anos estudados. A área urbanizada e impermeabilizada, localizada nas zonas Norte, Sul, Oeste e Central, é a mais afetada. Nestas áreas, os rios e riachos antes naturais foram estreitados e canalizados para a construção de micro e macrodrenagens, atualmente ineficientes para o escoamento das águas pluviais. Apesar dos bairros nobres serem alagados e mesmo inundados, os maiores impactos ocorrem nos bairros mais simples devido à precariedade habitacional com carência de serviços essenciais básicos. A urbanização acelerada de forma inadequada nos bairros da zona de expansão deverá apresentar os mesmos problemas da região excessivamente urbanizada nos próximos anos. A minimização das inundações e alagamentos depende da participação efetiva dos órgãos públicos, privados, comunidade científica e sociedade em geral para o desenvolvimento de instrumentos específicos, em termos de planejamento de ações, definição de procedimentos e designação de responsabilidades.

**Palavras-chave:** Método multicriterial; Impermeabilização do solo; Precipitação pluviométrica; Sistema de micro e macrodrenagem.

<sup>1</sup> Doutorado em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP). Mestrado em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Especialização em Ensino de Geociências para Nível Superior pela Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS). Graduação em Engenharia Geológica pela Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Professor do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária e do Programa de Pós-Graduação em Geociências e Análise de Bacias da Universidade Federal de Sergipe (UFS) – e-mail: [psrn.geologia@gmail.com](mailto:psrn.geologia@gmail.com) \* Autor correspondente.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela UFS – e-mail: [lenilson santana@academico.ufs.br](mailto:lenilson santana@academico.ufs.br)

## ABSTRACT

*The flat to slightly undulating topography, combined with the direct influence of syzygy tides, is a contributing factor to inundation in the municipality of Aracaju during periods of intense rainfall. Flooding in densely urbanized areas is mainly caused by soil impermeability and the inefficiency of the drainage system. This study presents spatiotemporal scenarios of inundated and flooded areas in Aracaju, based on Inverse Distance Weighting (IDW), Kernel Density Estimation, and Hierarchical Multicriteria Analysis for the years 2021, 2022, and 2023. The modeling revealed that more than 50% of the municipality is in a vulnerable situation, with high to very high risk during the years analyzed. The most affected areas are the urbanized and impermeable zones in the North, South, West, and Central regions. In these areas, rivers and streams that were once natural have been narrowed and channeled to build micro and macro drainage systems, which are currently inefficient for rainwater runoff. Although high-income neighborhoods also experience flooding and inundation, the most severe impacts occur in lower-income areas due to precarious housing conditions and a lack of essential services. The rapid and disorganized urban expansion in outlying areas is likely to reproduce the same problems found in the already over-urbanized regions. Mitigating flooding and inundation requires the effective involvement of public and private sectors, the scientific community, and society as a whole in developing specific instruments for planning actions, defining procedures, and assigning responsibilities.*

**Keywords:** *Multicriteria Analysis; Soil impermeability; Rainfall; Micro and macro drainage system.*

Data de submissão: 26/12/2024

Data de aprovação: 07/05/2025

## 1 INTRODUÇÃO

A inundação   um processo geológico natural influenciado por fatores morfométricos, hidrográficos, climáticos, edáficos e florísticos (Azevedo *et al.*, 2020; Nascimento; Oliveira, 2022). No entanto,   acentuado pelo intenso desmatamento das florestas e matas ripárias, convertidas em áreas urbanas, assoreamento, retifica o e canaliza o dos rios (Santana; Nascimento, 2021; Silva; Rodrigues; Fernandes, 2024). A desigualdade social e a falta de planejamento urbano ocasionam a ocupa o de área inadequadas, como as áreas de várzeas, pelas popula es mais carentes (Silva; Vieira; Alves, 2023).

De acordo com Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT; 2007), os alagamentos estão diretamente relacionados ao sistema de drenagem. Assim a obstru o, o subdimensionamento e a falta de manuten o nos canais de micro e macrodrenagem

comprometem o adequado escoamento das águas pluviais, ocasionando o acúmulo da água da chuva no meio urbano. A impermeabilização do solo pela urbanização impede a infiltração da água precipitada, e segundo Nylander *et al.* (2021), a disposição incorreta dos resíduos sólidos intensifica o problema pela redução da eficiência dos canais de drenagem urbana. Desta forma, os alagamentos acontecem principalmente em áreas urbanas, quando ocorrem intensas chuvas, dada à impermeabilização do solo e baixa capacidade de escoamento por parte da rede pluvial das cidades mal planejadas (Wollmann, 2015).

O município de Aracaju, capital de Sergipe, é uma região naturalmente suscetível aos alagamentos e inundações, pois está inserido na planície costeira dos estuários dos rios Sergipe e Vaza-Barris, formadores de duas principais bacias hidrográficas sergipanas homônimas. O município apresenta solos silto-argilosos de baixa permeabilidade e topografia predominantemente plana. A proximidade com o mar e a influência das marés de sizígia agravam sua suscetibilidade a inundações. Soma-se a impermeabilização da superfície pela urbanização excessiva. De acordo com Ruan *et al.* (2024), 80% das mortes relacionadas a inundações no mundo ocorrem a menos de 100 km da costa.

Desta forma, estas características fisiográficas intrínsecas, do município de Aracaju, facilitam a ocorrência das inundações e alagamentos no outono e inverno, estações em que, normalmente, ocorrem as chuvas extremas. É relevante ressaltar que, apesar desses fenômenos ocorrerem nos bairros nobres com intensa impermeabilização do solo, as maiores áreas de riscos são as áreas precárias, em função da vulnerabilidade habitacional e ausência de infraestrutura básica, conforme Menezes *et al.*, 2024, e ocupação inadequada nas planícies de inundação (Danegulu *et al.*, 2024).

A prevenção de riscos alagamentos e inundações em áreas altamente urbanizadas e de expansão urbana, como é caso do município de Aracaju, deverá ser realizada a partir da análise das condições dos terrenos e índices pluviométricos, segundo Riani *et al.*, 2020, cuja análise é maximizada pelo emprego das geotecnologias (Moreira; Messias, 2020; Nascimento; Oliveira, 2022). A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento permitem modelar e estimar o alcance das inundações e alagamentos, empregando variáveis topográficas, morfométricas, hidrológicas e da cobertura do solo. De acordo com Schwantz e Feitosa (2022), estas ferramentas produzem informações precisas e eficientes na tomada de decisão.

Nessa seara, este trabalho emprega o Estimador de Densidade de Kernel, a Distância Inversa Ponderada (IDW) e o Processo Analítico Hierárquico (AHP) para a análise espaço-temporal das ocorrências de alagamento e inundação no município de Aracaju (SE), visando auxiliar os órgãos competentes na tomada de decisão sobre as áreas de risco.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A interação entre os aspectos geológico-geomorfológicos e as condições hidrometeorológicas caracterizam os riscos geo-hidrológicos, como as inundações (Ekmekcioglu; Koc, 2022; Öztürk *et al.*, 2024; Zhong *et al.*, 2024). A variação espaço-temporal dos rios reflete as flutuações no volume de água, dessa forma, na estiagem, o nível do rio é restrito à vazante. Por outro lado, nos períodos de alta precipitação, o volume de água atinge o leito maior do canal fluvial, sem extravasar, ocasionando as enchentes (Wollmann, 2015). Quando ocorre o transbordamento para a planície de inundação e terraços fluviais e fluviomarinhos, têm-se as inundações (Castro, 2003; Vieira *et al.*, 2022). Os alagamentos, em contrapartida, são o acúmulo momentâneo de água da chuva, principalmente em áreas urbanizadas, devido à ineficiência do sistema de drenagem, podendo ter ou não relação com processos de natureza fluvial (IPT, 2007, Amaral; Ribeiro, 2009; Bloch *et al.*, 2015).

O Estimador de Densidade de Kernel é uma forma não-paramétrica para determinar a função de probabilidade de uma variável aleatória, possibilitando estimar o evento em toda a área, mesmo onde o processo não tenha gerado nenhuma ocorrência (Wand; Jones, 1995). O método estima a densidade de ocorrência do fenômeno, utilizando amostras pontuais, através da estatística não-paramétrica, cuja distribuição das amostras pontuais é transformada em uma superfície contínua (Barbosa *et al.*, 2014; Pisane; Bellini, 2021).

A Distância Inversa Ponderada (*Inverse Distance Weighting* – IDW) é uma técnica empregada para estimar a distribuição espacial de um fenômeno, de rápida velocidade de processamento, e que não estima valores do ponto vizinho amostrado, maiores ou menores que os quantitativos máximos e mínimos dos dados informados (Li; Heap, 2008; Landim, 2011). Segundo Perez, Afonso e Mota (2018), o modelo consiste em multiplicar os valores das amostras pelo inverso das suas respectivas distâncias ao ponto de referência para a interpolação dos valores.

O interpolador IDW é baseado na dependência espacial, cujas amostras pontuais mais próximas terão uma maior correlação e, conseqüentemente, será atribuído um maior peso em relação às amostras mais distantes do ponto a ser interpolado. Gholipour, Shahbazi e Behnia (2013) consideram o método adequado para dados espaçados irregularmente, como são os dados pluviométricos utilizados neste trabalho. Por ser determinístico, ao estimar a influência entre os pontos não associa as incertezas aos valores previstos e não incorpora os erros aleatórios (Setianto; Triandini, 2013).

A análise multicritério é uma técnica empregada para facilitar a análise de problemas complexos, dividindo-os em subproblemas, que serão analisados de forma independente, através de modelagens matemáticas e do julgamento do tomador de decisão (Pinese Júnior; Rodrigues, 2012). Para realizar a análise de forma independente, é necessário atribuir pesos quantitativos hierarquizados, a fim de estabelecer a importância relativa de cada fator, que será comparado entre si na matriz de comparação pareada (Silva; Nunes, 2009). Goulart e Matsuoka (2021) destacam que a aplicação do método AHP, desenvolvido na década de 1970 por Saaty (1977), mostrou-se eficiente para identificar as áreas com maiores registros de alagamentos e inundações, pois o problema é estruturado como hierarquia e, posteriormente tem-se um processo de priorização. Saaty (1990) explica que priorização envolve explicitar julgamentos de questões de dominância de um elemento sobre outro quando comparados a uma prioridade.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

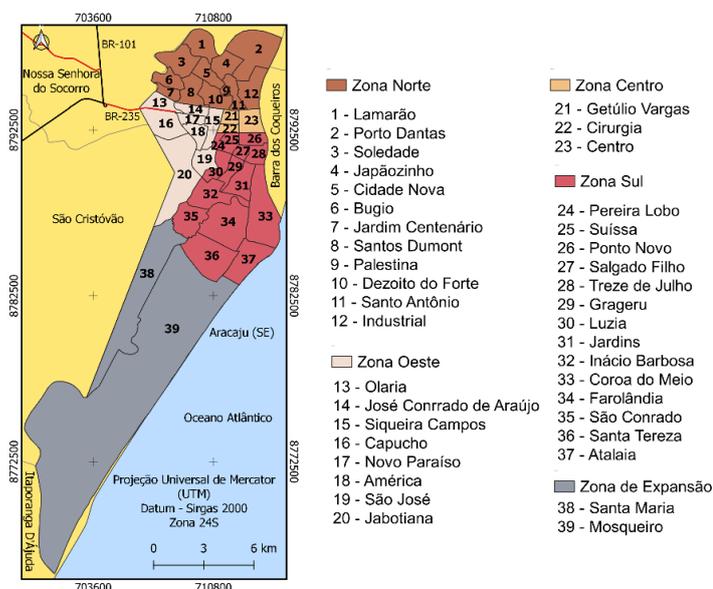
#### **3.1 Área de estudo**

Inserido no litoral do estado de Sergipe, o município de Aracaju apresenta uma área e população de aproximadamente 182 km<sup>2</sup> e 602.800 habitantes, respectivamente, e está localizado entre as coordenadas geográficas 37°01'12" a 37°11'50" de longitude Oeste e 10°50'45" a 11°09'51" de latitude Sul. As principais rodovias de acesso são as BR-101 e BR-235, que atravessam o estado nas direções N-S e L-O, respectivamente. Ademais, os municípios limítrofes são Barra dos Coqueiros, Itaboraranga D'Ájuda, São Cristóvão e Nossa Senhora do Socorro que constituem a região metropolitana denominada de Grande Aracaju.

Os 39 bairros de Aracaju estão distribuídos em 5 zonas (Mapa 1), com exceção da Zona de Expansão, as demais zonas concentram 37 bairros na região acentuadamente urbanizada e impermeabilizada. É nessa região que estão alocadas 12, das 15 estações pluviométricas do município. Os dados pluviométricos estão disponíveis, desde julho de 2020, no portal ClimAju (<https://www.instarain.com.br/climaju>). O portal foi idealizado pela Prefeitura de Aracaju, e coordenado pela Secretaria Municipal da Defesa Social e da Cidadania (Semdec), e monitorado pela Defesa Civil do Município.

Delimitada pelos estuários dos rios Sergipe e Vaza-Barris, classificados como estadual e federal, respectivamente, seus principais afluentes, no município, são os rios do Sal, Poxim e Pitanga e Santa Maria (Bomfim *et al.*, 2002). Os vários riachos naturais, atualmente, transformados em canais de drenagem urbana de águas pluviais formam 126 pequenas bacias de drenagem, onde 50% não possuem boa permeabilidade, concentradas na área extremamente urbanizada (Aracaju, 2015). Essa transformação se deu tanto por meio de obras de canalização como por ocupação urbana que forçou a retificação desses cursos fluviais. Vale ressaltar que as áreas permeáveis, formadas por solos argilo-silto-arenosos provenientes das rochas areníticas do Grupo Barreiras e das Formações Superficiais de ambiente costeiro não significam boa drenagem, pois o relevo plano dificulta o escoamento superficial (GIAU, 2010).

Mapa 1 – Localização do município de Aracaju/SE



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

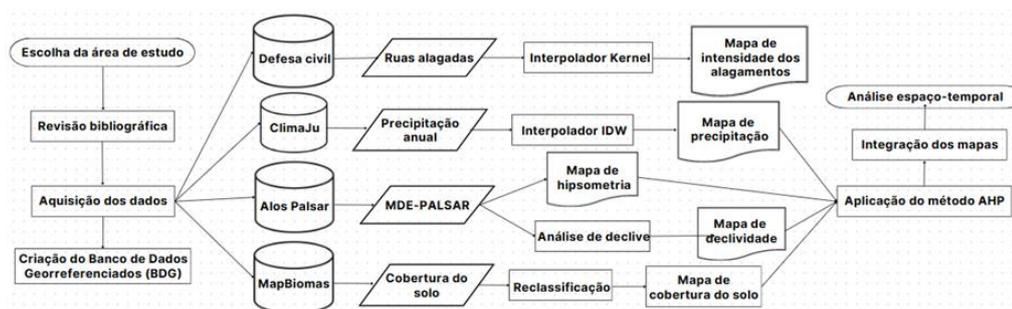
### 3.2 Materiais

Os materiais utilizados foram: (i) dados vetoriais do Atlas Digital para Recursos Hídricos do estado de Sergipe (Semac, 2024); (ii) dados matriciais do Projeto MapBiomias – Coleção 7 e 8 da Série Anual de Mapas de Uso e Cobertura da Terra do Brasil (Souza Júnior *et al.*, 2020); (iii) dado matricial do sensor ALOS-PALSAR (Modelo Digital de Elevação - MDE) (Earth Data, 2012); (iv) dados vetoriais de precipitação mensal e áreas de riscos a inundação (Defesa Civil de Aracaju, 2023); (v) programa de geoprocessamento QGIS (versão 3.38) da *Open Source Geospatial Foundation - OSGeo* (QGIS Development Core Team, 2024).

### 3.3 Procedimentos técnicos

O procedimento inicial foi a criação de um Banco de Dados Georreferenciados (BDG) no programa de geoprocessamento QGIS. Estes bancos foram padronizados no Sistema de Coordenadas UTM - Datum Sirgas-2000 - Zona 24 Sul, permitindo a importação e manipulação dos dados vetoriais e matriciais das diversas fontes supracitadas para os procedimentos posteriores resumidos no fluxograma a seguir (FIGURA 1).

Figura 1 – Procedimentos técnicos aplicados



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Para a confecção do mapa hipsométrico, o dado MDE-Palsar foi fatiado em intervalos fixos de 5m, e em intervalos variáveis para o mapa de declividade. Como o município de Aracaju apresenta um relevo plano a suavemente ondulado e com baixas altitudes, as classes hipsométricas definidas foram 0-5m, 5-10m, 10-15m, 15-20m e maior que 20m; e as classes de declive seguiram os intervalos propostos pela Embrapa (1979) até o declive de 20%, e redefinindo as últimas classes (20 a 30% e maior que 30%).

Os mapas de cobertura do solo, disponíveis no formato matricial com Datum WGS-84, foram reprojetados para o Datum Sirgas 2000 e as classes originais, cujos polígonos eram muito pequenos foram associadas com as classes temáticas mais significativas e semelhantes, a partir da tabela de atributos e das características das classes temáticas. Essa associação baseou-se nos procedimentos realizados por Barros *et al.* (2020), Santos e Nascimento (2021) e Sardhara *et al.* (2021), e foi realizada para otimizar os cálculos para aplicação do método AHP. Desta forma, as classes de floresta e restinga foram consideradas como vegetação, as áreas com campo alagado e apicum foram incorporadas ao manguezal e o solo exposto e a agricultura foram incorporados à pastagem. No entanto para apresentação dos resultados, o mapa de cobertura do solo foi apresentado com a sua legenda original.

O mapa de precipitação anual foi confeccionado pela espacialização dos dados pontuais de precipitação mensal obtidos pelas 15 estações pluviométricas do município de Aracaju, empregando o método IDW. As coordenadas geográficas das estações pluviométricas identificadas no *Google Earth* e os respectivos valores das precipitações anuais foram importados para o *software* QGIS. A partir da ferramenta de espacialização *numerical digitize* gerou-se uma camada contendo os dados de precipitação anual acumulada, latitude, longitude e altitude de cada estação pluviométrica. Em seguida foi aplicado o método IDW de acordo com a Equação 1, onde  $W$  é o valor interpolado,  $Z$  é o valor medido no ponto  $i$ ,  $d$  é a distância ao ponto  $i$ ,  $p$  é o expoente de ponderação e  $n$  é o número de amostras pontuais.

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_i^p} Z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \quad (1)$$

O mapa de calor (estimador de densidade de Kernel) foi confeccionado utilizando os dados de alagamento da Defesa Civil. As coordenadas das ruas alagadas e inundadas, referentes aos anos 2021, 2022 e 2023, foram conferidas no *Google Earth* e importadas para o *software* QGIS. Em seguida foi realizada a espacialização pela ferramenta *numerical digitize*, gerando uma camada contendo o nome, latitude e longitude de cada rua afetada pelo alagamento, para a aplicação do método de interpolação de Kernel (Equação 2). Onde  $k$  é uma função de densidade bivariada,  $t$  é o raio de influência e  $s$  é o valor aleatório. Esse interpolador auxiliou na identificação de regiões com elevada recorrência de alagamentos e inundações. Para

garantir que o produto gerado permanecesse restrito às áreas afetadas, foi aplicado um raio de alcance de 500 metros.

$$\beta_t = \sum_{i=1}^n \frac{1}{t^2} k \left( \frac{s-s_i}{t} \right) \quad (2)$$

Os mapas de vulnerabilidade ao alagamento e inundação foram realizados pelo método AHP, que consiste em decompor um problema complexo em variáveis ou subproblemas que serão avaliados de forma independente (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012). Assim, foram atribuídos pesos quantitativos hierarquizados de acordo com o grau de influência de cada critério. Os pesos variam entre 1 e 9, representando desde uma influência insignificante a uma importância absoluta, respectivamente, ou seja, de acordo com o grau de importância no risco de alagamento e inundação (TABELA 1). Desta forma, as menores declividades em terrenos planos a suavemente ondulados com alta precipitação e próximos aos corpos d'água e em áreas impermeabilizadas são mais vulneráveis aos alagamentos e inundações. Foram elaborados três mapas de vulnerabilidade, utilizando a precipitação de 2021, 2022 e 2023, separadamente, a fim de compreender a dinâmica da ocorrência de alagamentos e inundações nos respectivos anos.

Tabela 1 – Atribuição dos pesos (P) às variáveis hipsometria (Hip), declividade (Dec), cobertura do solo (CobS), precipitação 2021, 2022 e 2023 (Prec21, Prec22, Prec23)

Hip	P	Dec	P	CobS	P	Prec21 (mm)	Prec22 (mm)	Prec23 (mm)	P
0–5m	9	0–3%	9	Corpo D'água	9	1000-1200	1000-1200	1300-1500	3
5–10m	7	3–8%	7	Área Urbana	9	1200-1350	1200-1350	1500- 1600	5
10–15m	5	8–20%	5	Mangue	6	1350-1450	1350-1450	1600-1700	7
15–20m	3	20–30%	3	Pastagem	3	1450-1700	1450-1700	1700-2100	9
>20m	1	>30%	1	Vegetação	1	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Após a elaboração dos mapas de critério, realizou-se a normalização dos dados, pois os pesos atribuídos às variáveis não estão na mesma escala, impossibilitando seu agrupamento. A normalização ou padronização dos pesos cresce linearmente do menor para o maior de forma uniforme (Equação 3), onde  $R_i$  = fator a ser normalizado,  $P_{mín}$  = peso mínimo e  $P_{máx}$  = peso máximo.

$$Normalização\ das\ variáveis(X_i) = \frac{(R_i - P_{mín})}{(P_{máx} - P_{mín})} \quad (3)$$

Em seguida, foi construída a matriz de comparação ponderada, empregando a escala de Saaty de números absolutos entre 1 e 9 aos julgamentos qualitativos de importância relativa. Dessa forma, atribui-se valores numéricos maiores aos critérios de maior importância relativa para a ocorrência de alagamentos e inundações, promovendo uma hierarquia entre os critérios utilizados, comparando um com o outro em pares (TABELA 2). Essa análise permite que os fatores, que possuem conexão limitada e que seriam difíceis de analisar em conjunto, sejam comparados entre si. É de responsabilidade do julgador analisar e aplicar os pesos da escala de Saaty com base em seu próprio julgamento sobre a relevância de cada variável na ocorrência de um determinado evento. Desta forma, na estruturação da hierarquia são definidas as variáveis que irão compor a matriz de comparação, determinando os seus níveis de importância. Neste trabalho, determinou-se que a precipitação é a variável de maior importância, seguida da cobertura do solo. A declividade e a hipsometria apresentam o nível inferior da matriz, e com a mesma importância.

Tabela 2 – Matriz de comparação pareada

Fatores	Precipitação	Cobertura do solo	Declividade	Hipsometria
Precipitação	1	2	3	3
Cobertura do solo	1/2	1	3	3
Declividade	1/3	1/2	1	1
Hipsometria	1/3	1/2	1	1

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Após a construção da matriz de comparação pareada, foi efetuado o cálculo do peso processado de cada variável, o qual reflete a influência de cada fator na ocorrência de alagamentos e inundações. Este cálculo foi realizado por meio da soma dos elementos de cada linha da matriz ( $A_w$ ), dividida pela ordem da matriz  $n$  (Equação 4) (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012).

$$\text{Matriz resultante } e(P_n) = \sum \frac{a_{mn}}{n} \quad (4)$$

Em seguida, realizou-se o cálculo do autovalor ( $\lambda_{\text{máx}}$ ) (Equação 5), o autovalor máximo é calculado pela multiplicação da matriz de comparação pelo vetor coluna  $W$ , seguido da divisão desse novo vetor encontrado,  $AW$ , pelo primeiro vetor  $W$ .

$$\text{Autovalor } (\lambda_{\text{máx}}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[A]_{wi}}{w_i} \quad (5)$$

Em seguida, realizou-se o cálculo do índice de consistência (IC) (Equação 6), índice randômico (IR) (Tabela 3), que é um valor tabelado derivado de 500 matrizes recíprocas de forma randômica (Pinese Júnior e Rodrigues, 2012) e razão de consistência (RC) (Equação 7). Esse procedimento é fundamental para avaliar a aceitabilidade dos pesos atribuídos no início da análise, uma vez que o julgador pode incorrer em erros ao construir a matriz pareada. Para evitar erros, recomenda-se que o julgador analise a coerência hierárquica das variáveis nas etapas posteriores. Assim, as variáveis precipitação e a impermeabilização do solo são hierarquicamente mais importantes para a ocorrência de alagamentos e inundação.

$$\text{Índice randômico } (IC) = \frac{(\lambda_{\text{máx}} - n)}{(n-1)} \quad (6)$$

Tabela 3 – Valores de IR para quantidade de critérios

<b>n</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>IR</b>	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1980)

$$\text{Razão de consistência}(RC) = \frac{IC}{IR} \quad (7)$$

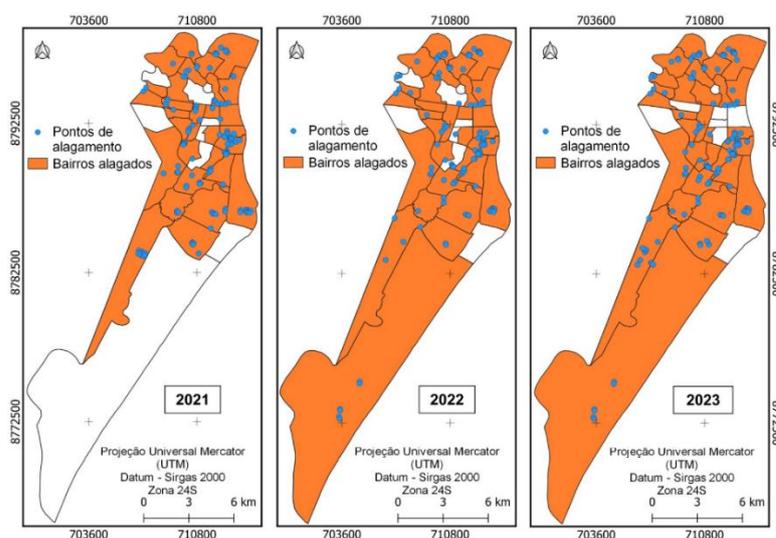
Segundo Saaty (1980), a razão de consistência (RC) é um indicador fundamental na análise multicritério. Quando essa razão é inferior a 0,1, significa que os valores atribuídos pelo julgador são coerentes, caso contrário, houve erros na atribuição dos pesos, e a matriz de comparação precisa ser revista. Os pesos obtidos para o índice pluviométrico (IP), cobertura do solo (CS), hipsometria (H) e declividade (D) foram, respectivamente, 0,412, 0,344, 0,122 e 0,122, cuja soma é igual a 1,0. Por fim, foram confeccionados os mapas de vulnerabilidade ao alagamento, realizando a integração dos fatores com seus respectivos pesos (Equação 8).

$$AHP = (IP \times 0,412) + (CS \times 0,344) + (H \times 0,122) + (D \times 0,122) \quad (8)$$

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos anos de 2021, 2022 e 2023 foram identificadas 52, 56 e 74 ruas alagadas, respectivamente (MAPA 2). Estas ruas, localizadas em 31 bairros, dos 39, existentes no município, foram espacializadas na forma de pontos para a aplicação do procedimento de interpolação de Kernel. Destaca-se que, em praticamente todos os bairros, houve a recorrência de alagamentos, possibilitando a realização de políticas públicas preventivas e de minimização à ocorrência de alagamentos. Estas políticas devem se concentrar, principalmente, na manutenção dos canais de micro e macrodrenagem (Monteiro; Mendes, 2020; Silva Júnior *et al.*, 2020), no descarte apropriado dos resíduos sólidos urbanos (Fonseca; Ferent, 2022) e na minimização da impermeabilização das áreas urbanas (Ferrer *et al.*, 2025).

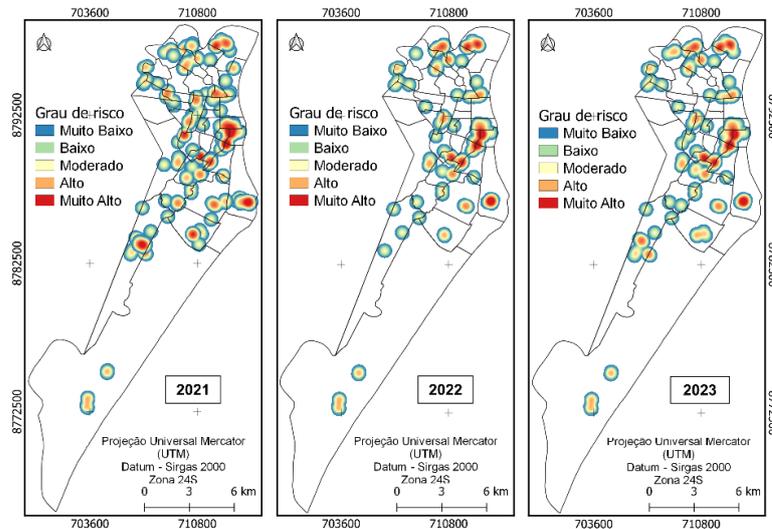
Mapa 2 – Espacialização das ruas e bairros alagados nos anos de 2021, 2022 e 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A intensidade da ocorrência de alagamentos se mostrou semelhante nos três anos, e os bairros São José, Treze de Julho, Salgado Filho, Luzia, Grageru, Jardins, Coroa do Meio, Porto Danta e Lamarão apresentaram alta intensidade na ocorrência de alagamentos (MAPA 3). Embora alguns desses bairros sejam considerados nobres, sua localização em uma região estuarina do rio Sergipe, com a presença de manguezais, os torna naturalmente suscetíveis a alagamentos e inundações (Nascimento e Oliveira, 2022). Além disso, existem duas áreas classificadas como de risco médio a inundação nos bairros Treze de Julho e Salgado Filho.

Mapa 3 – Intensidade da ocorrência de alagamentos nos anos de 2021, 2022 e 2023

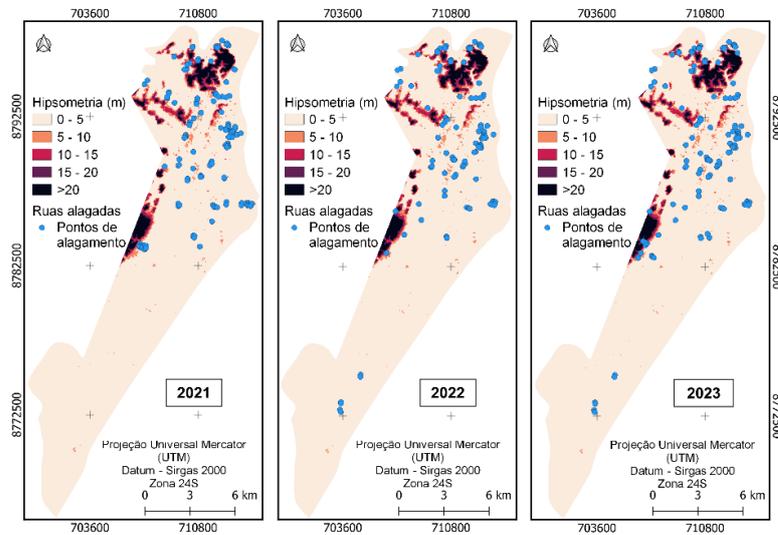


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

O município de Aracaju apresenta relevo plano a levemente ondulado, formado por planícies marinha, flúvio-marinha e fluvial. Assim, aproximadamente 93% da superfície apresenta altitudes de no máximo 5 metros e menos que 3% é composta por elevações maiores que 20 metros (MAPA 4).

Regiões com baixas altitudes são mais suscetíveis a alagamentos e inundações devido à ação da gravidade, que faz com que a água da chuva escoe das maiores altitudes para as menores cotas altimétricas, seguindo o fluxo natural da bacia hidrográfica. Essa dinâmica geológico-geomorfológica contribui para a suscetibilidade do município de Aracaju, visto que, em ambos os anos, quase todos os pontos de alagamento se encontram em regiões com cotas que não ultrapassam os 5 metros. No entanto, em 2021, 2022 e 2023, foram identificados, respectivamente, dois, quatro e cinco pontos de alagamentos no bairro Santa Maria, situados em regiões com altitudes que variam entre 10 e 15 metros.

Mapa 4 – Espacialização das ruas alagadas no mapa hipsométrico entre os anos de 2021, 2022 e 2023

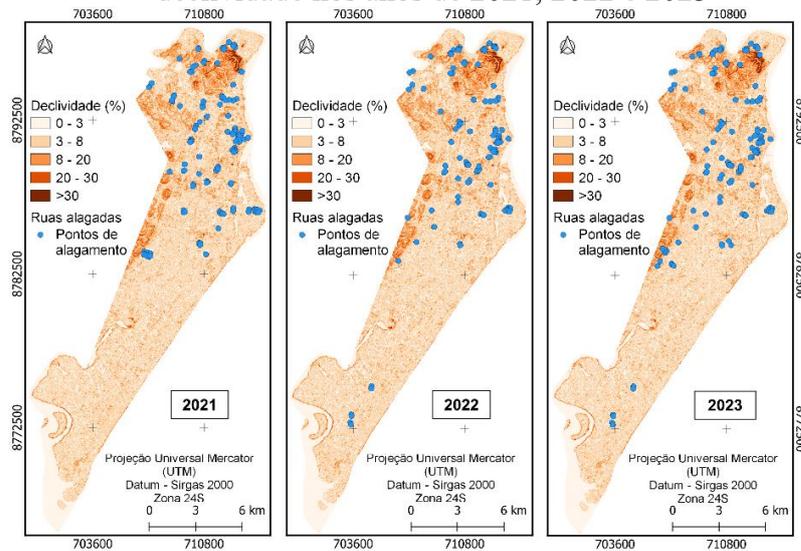


Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A regiões planas a levemente onduladas são mais suscetíveis a alagamentos e inundações, visto que, quanto menor o declive, menor é a ação da gravidade e, consequentemente, menor será a energia cinética, o que influencia diretamente o acúmulo de água. Essa suscetibilidade aumenta em áreas urbanas muito permeabilizadas, por outro lado, as regiões com vegetação apresentam maior capacidade de infiltração e evapotranspiração da água precipitada, reduzindo a acumulação da água. As classes de declividade com inclinações de até 8% correspondem a aproximadamente 86% do município de Aracaju, e são os terrenos que mais apresentam pontos de alagamento (MAPA 5).

O município de Aracaju apresenta aproximadamente 50% da área intensamente urbanizada e impermeabilizada concentrada nas zonas Norte, Sul e Central (MAPA 6). Estas regiões são vulneráveis à ocorrência de alagamentos e inundações, visto que há redução significativa das áreas permeáveis em decorrência da infraestrutura urbana, como também o aumento da produção de resíduos sólidos urbanos e sucessiva disposição em locais inadequados, comprometendo a eficiência do sistema de macro e microdrenagem, nem sempre projetados para suportar o volume de água.

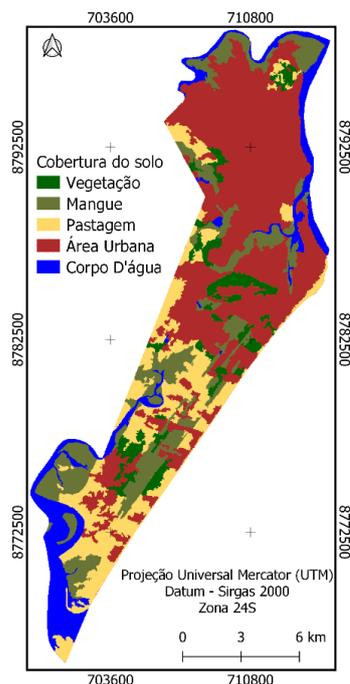
Mapa 5 – Espacialização das ruas alagadas no mapa de declividade nos anos de 2021, 2022 e 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Os bairros Mosqueiro e Santa Maria, localizados na Zona de Expansão Urbana (ZEU), apresentam um processo de urbanização acelerado, evidenciado pelas manchas de área urbana que se formam na região. Esses bairros apresentam várias ocorrências de alagamento, cujos registros aumentam a cada ano, indicando necessidade de intervenção por parte do poder público. A região tende a apresentar os mesmos problemas da região intensamente urbanizada, caso o crescimento urbano continue em ritmo acelerado e sem planejamento urbano adequado. Duarte, Santos e Castelhana (2021) relataram que a zona de expansão é uma região de alto risco a alagamentos e inundações, pois apresenta uma morfologia lacustre soterrada para a construção de condomínios de luxo.

Mapa 6 – Mapa de cobertura do solo

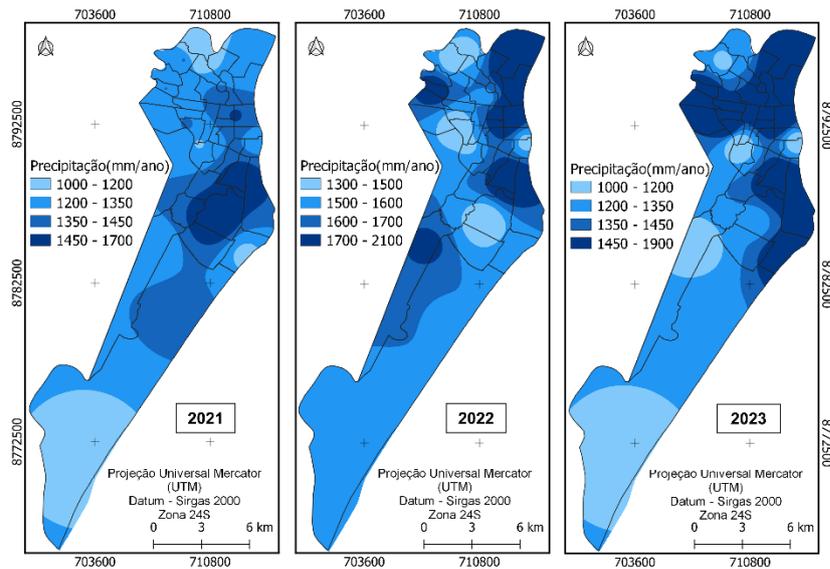


Fonte: Adaptado de Souza Júnior *et al.* (2020)

Os maiores índices pluviométricos da região fortemente urbanizada são devido às doze estações pluviométricas, em oposição à ZEU com apenas 3 estações (MAPA 7). A elevada taxa de impermeabilização do solo e os altos índices pluviométricos desencadeiam os alagamentos e inundações, acarretando sérios transtornos para a população local. Destaca-se que, embora o ano de 2023 tenha registrado maiores índices pluviométricos, isso não significa necessariamente que irá apresentar um aumento nos pontos de alagamento. Na verdade, as chuvas extremas, concentradas em curtos períodos, têm um potencial muito maior de gerar alagamentos e inundações do que chuvas que ocorrem de forma contínua e regular.

Segundo Duarte, Santos e Castelhana (2021), para o município de Aracaju, consideram-se eventos pluviais de risco extremo quando o volume de chuvas atinge, estatisticamente, índice igual ou superior a 30 mm/24h, tendo por base o percentil 95. Este cálculo indica como evento pluvial extremo, considerando-se a dinâmica da cidade, dentre os dias de chuva, os eventos que se situam entre os 5% maiores valores da série histórica estudada. É comum, principalmente nos meses de janeiro, fevereiro, março, julho e agosto, a ocorrência de precipitações mais acentuadas, frequentemente superiores a esse limite de 30 mm/24h.

Mapa 7 – Mapas de precipitação de 2021, 2022 e 2023



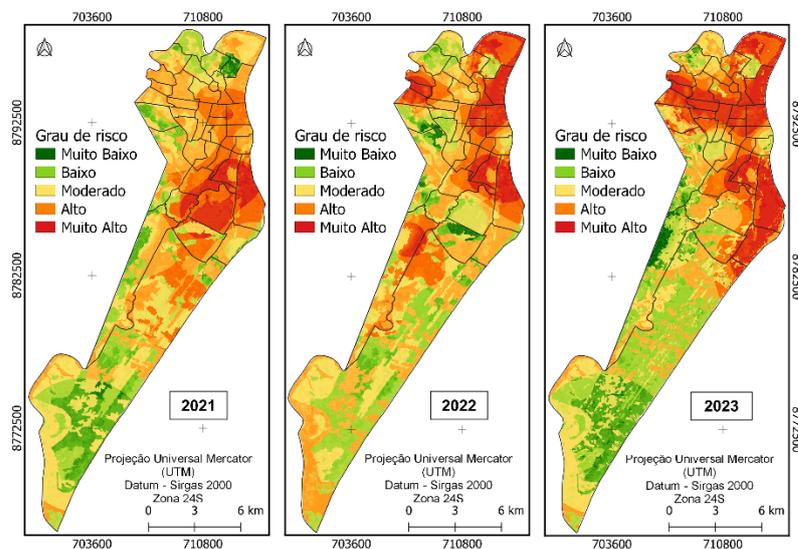
Fonte: Elaborado pelos autores, 2024

O município de Aracaju apresenta características geológico-geomorfológicas favoráveis à ocorrência de alagamentos e inundações. Inserido em uma região de relevo predominantemente plano e levemente ondulado, entre os estuários dos rios Sergipe e Vaza-Barris, com a presença de manguezais, que são ecossistemas alagadiços e altamente suscetíveis aos efeitos das marés.

Essas condições naturais, somadas à urbanização e ao uso do solo, podem intensificar os riscos relacionados a inundações e alagamentos na região, especialmente em Aracaju, que acabou soterrando e canalizando vários cursos d'água durante seu processo de expansão, deixando uma grande porção do município vulnerável a esses perigos. Nos três anos, mais de 50% da área foi classificada sob risco alto e muito alto, conforme Mapa 8 e a Tabela 4, o que contribui para a recorrência de alagamentos e inundações.

Em ambos os anos, as zonas Norte, Sul, Centro e Oeste apresentaram os maiores índices de vulnerabilidade. Essa realidade se deve à intensa urbanização dessas áreas, que apresenta altas taxas de impermeabilização, tornando-as mais suscetíveis a alagamentos e inundações.

Mapa 8 – Mapa de vulnerabilidade à inundação e alagamento nos anos de 2021, 2022 e 2023



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Tabela 4 – Vulnerabilidade à inundação e alagamento no município de Aracaju/SE

Classes	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
	2021	2021	2022	2022	2023	2023
Muito Baixo	2,52	1,40	1,92	1,06	2,45	1,32
Baixo	21,83	12,09	12,69	7,03	20,26	10,88
Moderado	52,53	29,11	61,61	34,14	54,64	29,35
Alto	65,98	36,56	62,74	34,76	41,40	22,24
Muito Alto	37,61	20,84	41,51	23,01	67,42	36,21

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

No ano de 2021, os bairros Jardins, Coroa do Meio, Inácio Barbosa, Farolândia e São Conrado apresentaram o risco mais alto para ocorrência de alagamentos, apresentando 40 pontos de alagamento. No ano de 2022, os bairros Grageru, Jardins, Coroa do Meio, Cirurgia, Centro, Getúlio Vargas, Santo Antônio, Industrial, Porto Dantas, Olaria, Jardim Centenário e Bugio foram identificados como os de maior risco para alagamentos, apresentando 36 pontos de alagamento. Em 2023, o cenário se agravou com a inclusão de mais bairros em situação de alto risco, entre eles Porto Dantas, Industrial, Santo Antônio, Palestina, Japãozinho, Dezoito do Forte, Jardim Centenário, Olaria, José Conrado de Araújo, Novo Paraíso, Siqueira Campos, Getúlio Vargas, Centro, Cirurgia, Grageru, Jardins, Inácio Barbosa, Coroa do Meio e Atalaia, apresentando 60 pontos de alagamento.

Além disso, observa-se que a ZEU possui algumas regiões com risco considerado baixo. No entanto, caso o crescimento urbano continue acelerado e sem um planejamento urbano adequado, toda essa região ficará suscetível a apresentar os mesmos problemas da área intensamente urbanizada, como evidenciado no bairro Mosqueiro em todos os anos analisados.

É importante destacar que, embora toda inundação seja considerada um alagamento, nem todo alagamento se classifica como uma inundação. Entretanto, essa distinção pode gerar confusão ao tentar diferenciar a ocorrência de um alagamento de uma inundação, através da espacialização das ruas afetadas a partir de pontos. Para facilitar a compreensão, foi realizada a integração dos mapas, juntamente com as áreas de risco de inundação fornecidas pela Defesa Civil de Aracaju, a fim de facilitar a visualização e a diferenciação das informações.

O Mapa 9 destaca as áreas de alagamento e inundação nos quatro bairros nobres da Zona Sul e fortemente urbanizados do município de Aracaju: São José, Salgado Filho, Treze de Julho e Jardins. Estes bairros apresentaram os mesmos pontos de alagamento nos três anos analisados. As áreas afetadas incluem: a interseção da Rua Campos com a Rua Dom José Thomaz; a Rua Arauá com a Rua Socorro; a Rua Lagarto com a Rua Campo do Brito; a Rua Celso Oliveira; a Praça da Imprensa e adjacências; a Avenida Francisco Porto; a Avenida Deputado Pedro Valadares; a Rua Vila Cristina e a Rua Desembargador José Sotero. Essas áreas são afetadas pelas marés altas, atreladas a altos índices pluviométricos, que influenciam no canal da Avenida Anísio Azevedo, o que resulta no seu transbordamento.

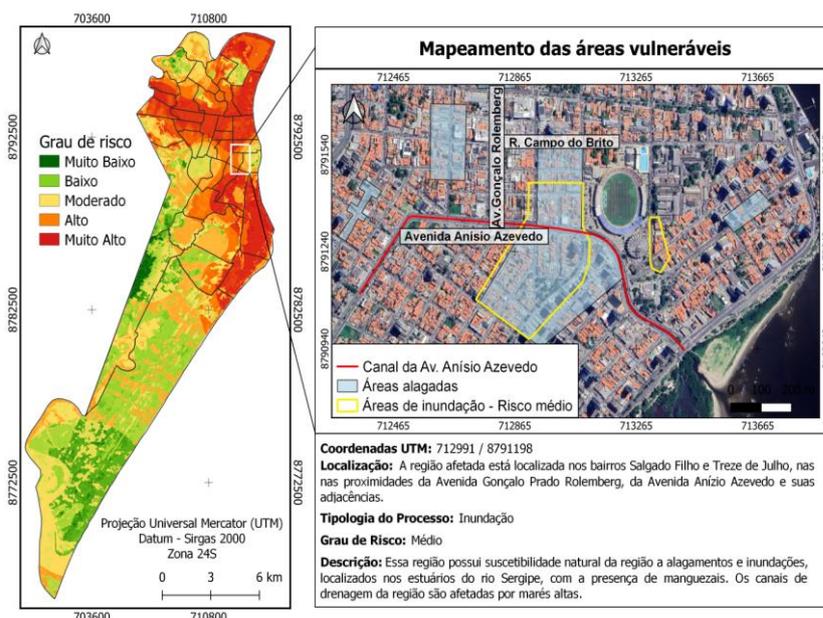
O Mapa 10 destaca as áreas de alagamento e inundação nos quatro bairros Olaria (Zona Oeste) e Jardim Centenário (Zona Norte), Japãozinho (Zona Norte), Lamarão (Zona Norte) e Ponto Novo (Zona Sul). Dessa forma, visando minimizar esse quadro de vulnerabilidade, há a necessidade de implantação de gestão integrada entre os sistemas de esgotamento sanitário e de drenagem pluvial urbana, como exposto por Turini *et al.* (2025), com estratégias e tecnologias eficazes.

Os alagamentos dos bairros Olaria e Jardim Centenário ocorreram próximo à Avenida Canal (Nova Liberdade). Essa área é classificada como de risco médio a inundação, situada às margens do Riacho do Palame e dos canais de drenagem, que frequentemente extravasam em períodos de chuvas extras, especialmente quando coincidem com marés de sizígia a partir de 2 metros, sendo uma região que apresenta recorrência (MAPA 10a).

Outro ponto que merece destaque é a recorrência no bairro Japãozinho, especificamente no loteamento Copacabana. Essa área apresenta um risco médio de inundação,

onde o canal frequentemente transborda em períodos de chuvas extremas, especialmente quando coincidem com marés de sizígia devido à influência do Rio do Sal, com lâmina d'água atingindo as residências e a via pública. O aterramento dos manguezais para a conversão em residências e demais infraestruturas urbanas e sucessiva impermeabilização do solo contribuem significativamente (MAPA 10b).

Mapa 9 – Áreas vulneráveis nos bairros São José, Salgado Filho, Treze de Julho e Jardins



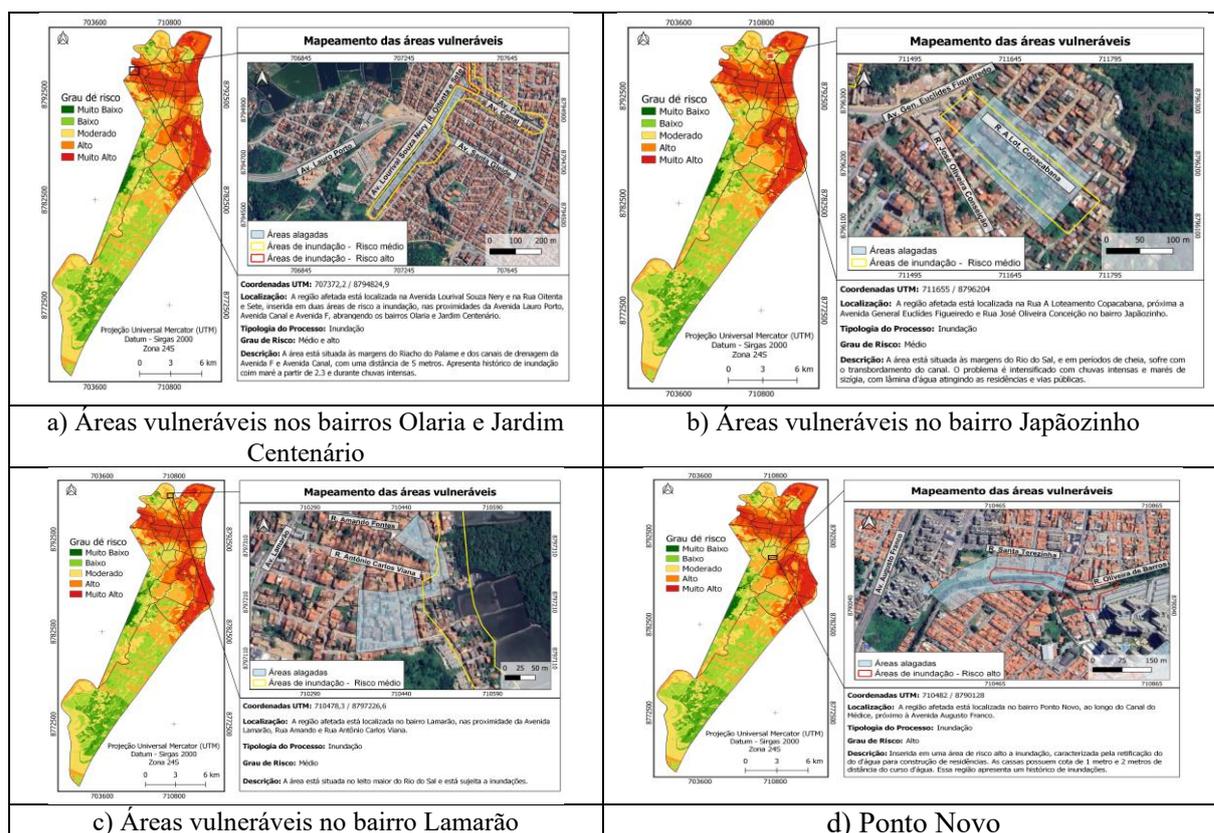
Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

Outra região que apresentou alagamentos é o bairro Lamarão, na Travessa 6. Essa localidade está situada em uma área de risco médio a inundações e abriga residências que se encontram inseridas no leito maior do Rio do Sal. Durante os períodos de enchentes, essas residências são frequentemente afetadas, evidenciando sua recorrência (MAPA 10c). A área está localizada às margens do manguezal do rio Poxim, sendo invadida pela população, com a demarcação dos lotes, o aterramento dos manguezais e, posteriormente, a construção das residências. Além disso, a presença de lixo, entulho e esgoto a céu aberto favorece o acúmulo de sólidos no sistema de drenagem, aumentando o risco de alagamentos, bem como o risco de doenças de veiculação hídrica.

O bairro Ponto Novo apresenta recorrência de inundações, localizada ao longo do Canal do Médice, que está inserido em uma área de risco alto a inundação. Essa área é

vulnerável devido à retificação do canal para construção de residências (MAPA 10d). Além disso, apresenta uma grande quantidade de resíduos sólidos em todo o canal, o que reduz sua eficiência. Segundo a Defesa Civil de Aracaju, a região apresenta um histórico de inundações.

Mapa 10 – Áreas vulneráveis nos bairros nos bairros Olaria e Jardim Centenário (a), Japãozinho (b), Lamarão (c) e Ponto Novo (d)



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

## 5 CONCLUSÃO

A metodologia aplicada mostrou-se eficiente na análise da dinâmica da ocorrência de alagamentos e inundações, permitindo não apenas a identificação de áreas vulneráveis, mas também daquelas com alta recorrência desses eventos. Essa identificação foi facilitada por meio do uso de geotecnologias, como sensoriamento remoto e geoprocessamento, que proporcionaram uma visão detalhada e precisa das condições das áreas analisadas. Assim, o emprego do Estimador de Densidade de Kernel, da Distância Inversa Ponderada (IDW) e o Processo Analítico Hierárquico (AHP) foi eficiente para a análise espaço-temporal das ocorrências de alagamento e inundação no município de Aracaju (SE).

Os produtos cartográficos presentes nesta pesquisa podem servir como ferramentas para auxiliar o corpo técnico na avaliação de áreas em situação de vulnerabilidade, além de facilitar a tomada de decisões quanto às medidas mitigadoras. Cabe ao poder público desenvolver e implementar soluções e intervenções eficazes para eliminar ou minimizar a ocorrência de alagamentos e inundações. Essa necessidade se torna evidente ao considerar que 31 bairros enfrentam as inundações e alagamentos recorrentes, e 20 deles são bairros de moradias precárias. Estes bairros estão inseridos nas zonas Norte, Sul, Oeste e Central, que se apresentam intensamente urbanizados e impermeáveis. Caso esse crescimento continue nesse ritmo em direção à zona de expansão, esta terá, num futuro próximo, os mesmos problemas de inundação e alagamento.

Os principais fatores antrópicos que contribuem para a recorrência de alagamentos e inundações, em Aracaju, são a impermeabilização do solo, o descarte irregular de resíduos sólidos, a canalização e o estreitamento dos rios e riachos, a ineficiência dos sistemas de micro e macrodrenagem e a construção de moradias precárias em áreas de risco, como as planícies de inundação fluvial e flúvio-marinha.

Recomenda-se ações para minimizar a ocorrência de alagamentos e inundações, como: (i) melhoria da rede de drenagem pluvial, visto que o crescimento urbano acelerado do município tem sobrecarregado a infraestrutura existente, tornando-a insuficiente para atender à demanda; (ii) preservação de áreas naturais e criação de espaços verdes, a fim de reduzir as taxas de impermeabilização do solo e aumentar a infiltração da água; (iii) incentivos fiscais para empreendimentos sustentáveis que adotem práticas, como a implementação telhados verdes, calçadas com grama e sistemas de captação de água da chuva, reduzindo o volume de água que chega à rede de drenagem; (iv) criação de um programa de coleta seletiva com educação ambiental, promovendo ações práticas e campanhas nas mídias digitais, com o objetivo de reduzir a quantidade de resíduos que chegam aos bueiros e canais, reduzindo sua eficiência. Tais medidas precisam de rigor técnico e treinamento da população residente nessas áreas.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundações e enchentes. In: TOMINAGA, L. D.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. cap. 3, p. 39-52.
- ARACAJU. Prefeitura Municipal de Aracaju. **Plano integrado de saneamento básico de Aracaju**. Aracaju: UFS/SMA, 2015.
- AZEVEDO, S. D. *et al.* Avaliação dos impactos socioambientais provocados por alagamentos e inundações no bairro Montese, localizado na Bacia do Tucunduba, Belém/PA. **Natural Resources**, Albuquerque, v. 10, n. 3, p. 38-50, 2020. DOI: <http://orcid.org/0000-0002-5105-1794>. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/CBPC2237-9290.2020.003.0005>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- BARBOSA, N. F. M. *et al.* Kernel smoothing dos dados de chuva no Nordeste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 7, p. 742-747, jul. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000700011>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/ryp8rQXmFsKKcRFXdjpYCJF/>. Acesso em: 07 nov. 2024.
- BARROS, G. V. P. *et al.* Eficiência de redes neurais artificiais na classificação de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba - SE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v.35, p. 823 - 833, oct-dec 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/VXzsdSsCHyFRNyv3mFw6FkG/?lang=pt>. Acesso em: 14 out. 2024.
- BLOCH, R.; JHA, A.K.; LAMOND, J. **Cities and flooding: A guide to integrated urban flood risk management for the 21st century**. Washington: World Bank, 2012.
- BOMFIM, L. F. C.; COSTA, I. V. G.; BENVENUTI, S. M. P. **Diagnóstico do Município de Aracaju**. Aracaju: CPRM, 2002.
- CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003.
- DANEGULU, A. *et al.* Characterizing urban flooding in the Kathmandu Valley, Nepal: the influence of urbanization and river encroachment. **Natural Hazards**, Berlim, v. 120, p. 10923-10947, 2024. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11069-024-06650-w>. Acesso em: 08 jan 2025.
- DEFESA CIVIL DE ARACAJU. **Mapeamento das áreas de risco à inundação**. Aracaju: CPRM, 2023.

DUARTE, T. L. S.; SANTOS., C. G.; CASTELHANO, F. J. Eventos de chuvas extremas associados aos riscos de inundações e de alagamentos em Aracaju, Sergipe. **GEOSABERES: Revista de Estudos Geoeducacionais**, Fortaleza, v. 12, n. 1, p. 256-273, 2021.

DOI: <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.1089>. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/journal/5528/552866526019/html/>. Acesso em: 13 out. 2024.

EARTH DATA. **Alaska Satellite Facility**. [S. I., s. n.], 2012. Disponível

em:<https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso em: 15 out. 2024.

EKMEKCIOGLU, Ö.; KOC, K. Explainable step-wise binary classification for the susceptibility assessment of geo-hydrological hazards. **CATENA**, Amsterdam, v. 216, n. 10, p. 63-79, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106379>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816222003654>. Acesso em: 25 nov. 2024.

FERRER, J.; DANÉRIS, M.; MARQUES, P. R. **RS: resiliência & sustentabilidade**. Porto alegre: Libretos, 2025.

FONSECA, M. N. da; FERENT, L. M. S. Resíduos sólidos urbanos e a ocorrência de alagamentos no núcleo urbano central de Curitiba. **International Journal of Environmental Resiliense Research and Science**, Toledo, v. 4, n. 3, p. 1-18, 2022. DOI:

<https://doi.org/10.48075/ijerr.v4i3.29479>. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/ijerr/article/view/29479>. Acesso em: 08 jan. 2025.

GHOLOPOUR, Y.; SHAHBAZI, M. M.; BEHNIA, A. An improved version of inverse distance weighting metamodel assisted Harmony Search algorithm for truss design optimization. **Latin American Journal of Solids and Structures**, São Carlos, v. 10, n. 2, p. 283-300, mar. 2013. Disponível em:

<https://www.scielo.br/lajss/a/qnthBSyW5dY4nG5WQsTQptj/?lang=en>. Acesso em: 05 dez. 2025.

GIAU. Gestão Integrada de Águas Urbanas em Aracaju - SE. **Relatório do Diagnóstico Qualitativo**. Aracaju: Grupo Técnico de GIAU, 2010.

GOULART, L. P.; MATSUOKA, J. V. Análise das áreas suscetíveis à alagamentos e inundações na área urbana do município de Uberlândia – MG utilizando geoprocessamento e o método de análise hierárquica AHP. **GETEC**, Itajubá, v. 10, n. 34, p. 21-44, 2021.

Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2566>. Acesso em: 15 dez. 2024.

IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos multivariados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LI, J.; HEAP, A.D. **Review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Canberra: Geoscience Australia, 2008.

MENEZES, F.A.G. *et al.* A expansão dos assentamentos precários e a ocorrência de eventos pluviométricos extremos no espaço urbano da cidade de Aracaju/Sergipe. **Scientific Journal ANAP**, Tupã, v. 02, n. 11, p. 27 - 43, 2024.

MONTEIRO, P. R. A.; MENDES, T. A. Avaliação e diagnóstico de sistema de drenagem urbana consolidado. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6516>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/343507771\\_Avaliacao\\_e\\_diagnostico\\_de\\_sistema\\_d\\_e\\_drenagem\\_urbana\\_consolidado](https://www.researchgate.net/publication/343507771_Avaliacao_e_diagnostico_de_sistema_d_e_drenagem_urbana_consolidado). Acesso em: 09 jan. 2025.

MOREIRA, F. D.; MESSIAS, E. C. Análise Ambiental da Paisagem urbana na região dos Canais de Drenagem de Águas Pluviais em Aracaju/SE. **Revista Expressão Científica (REC)**, Aracaju, v. 5, n. 1, p. 8-15, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ifs.edu.br/periodicos/REC/article/view/480>. Acesso em: 16 dez. 2024.

NASCIMENTO, P. S. R.; OLIVEIRA, K. S. Análise espaço-temporal da ocorrência de alagamentos em área intensamente urbanizada. **Revista Contexto Geográfico**, Maceió, v. 7, n. 14, p. 1-15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.28998/contegeo.7i14.13407>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/view/13407>. Acesso em: 15 dez. 2024.

NYLANDER, J. D. A. *et al.* Análise das causas e consequências de inundações e alagamentos na Bacia Hidrográfica da Tamandaré do município de Belém/PA. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais, v. 7, n. 5, p. 335-348, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n5-369>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/29920/23578>. Acesso em: 11 jan. 2025.

ÖZTÜRK, S.; YILMAZ, K.; DINÇER, A. E.; KALPAKCI. Effect of urbanization on surface runoff and performance of green roofs and permeable pavement for mitigating urban floods. **Natural Hazards**, Berlin, v. 120, p. 1237-12399, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06688-w>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/380974846\\_Effect\\_of\\_urbanization\\_on\\_surface\\_run\\_off\\_and\\_performance\\_of\\_green\\_roofs\\_and\\_permeable\\_pavement\\_for\\_mitigating\\_urban\\_floods](https://www.researchgate.net/publication/380974846_Effect_of_urbanization_on_surface_run_off_and_performance_of_green_roofs_and_permeable_pavement_for_mitigating_urban_floods). Acesso em: 10 jan. 2025.

PEREZ, G. C.; AFONSO, M. C.; MOTA, L. T. Métodos de análise espacial para sítios arqueológicos: um modelo preditivo para o estado de São Paulo. **Cadernos do Lepaarq**, Pelotas, v. 15, n.30, p. 98-120, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15210/lepaarq.v15i30.13746>. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/lepaarq/article/view/13746>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PINESE JÚNIOR, J. F.; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica - AHP - como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 23, p. 4-26, 2012. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>. Disponível em: <https://revistas.usp.br/rdg/article/view/47203>. Acesso em: 12 dez. 2024.

PISANI, R. J.; BELLINI, A. L. S. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento da densidade da população vulnerável do município de Alfenas-MG para ações prioritárias no enfrentamento da Covid 19. **Revista Cerrados (Unimontes)**, Montes Claros, v. 19, n. 2, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.46551/rc24482692202117>. Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/3990>. Acesso em: 10 jan, 2025.

QGIS Development Core Team. **A Free and Open Source Geographic Information System**. [S. I., s. n.], 2024. Disponível em: <https://www.qgis.org/en/site/>. Acesso em: 02 jan. 2024.

REANI, R. T. *et al.* Interfaces legais entre planejamento urbano e redução de riscos e desastres. **Revista Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.21, n. 76, p. 116-133, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG217651879>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/51879>. Acesso em: 22 jan. 2025.

RUAN, X.; SUN, H.; SHOU, W.; WANG, J. The impact of climate change and urbanization on compound flood risks in coastal areas: a comprehensive review of methods. **Applied Sciences**, Basel, v. 24, n. 12, p. 111-135, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142110019>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/385516827\\_The\\_Impact\\_of\\_Climate\\_Change\\_and\\_Urbanization\\_on\\_Compound\\_Flood\\_Risks\\_in\\_Coastal\\_Areas\\_A\\_Comprehensive\\_Review\\_of\\_Methods](https://www.researchgate.net/publication/385516827_The_Impact_of_Climate_Change_and_Urbanization_on_Compound_Flood_Risks_in_Coastal_Areas_A_Comprehensive_Review_of_Methods). Acesso em: 22 jan. 2025.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, Oxford, v. 15, n. 3, p. 234-281, jun. 1977. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022249677900335>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**: planning, priority setting, resource allocation. New York: McGraw-hill, 1980.

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, Oxford, v. 48, n. 1, p. 9-26, sep. 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/037722179090057I>. Acesso em: 13 ago. 2024.

SANTANA, K. E. S.; NASCIMENTO, P. S. R. Mapeamento das áreas urbanas propensas a alagamentos e inundações no município de Lagarto-SE. In: SILVA, A. P. (org.). **Engenharia: a máquina que constrói o futuro**. Pirajuá: Ed. Conhecimento Livre, 2021. cap. 41, p. 560 - 583.

SANTOS, M. S.; NASCIMENTO, P. S. R. Análise da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão hídrica pelo processo analítico hierárquico (AHP). **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, Salvador, v. 9, n. 1, p. 1-19, 2021. DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v9i1.37588>. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/37588>. Acesso em: 07 set. 2024.

SARDHARA, V. K., CHARM, P.; PATEL, K. C.; PATEL, R. J. Flood risk assessment and utilization of ahp in flood mapping: a comprehensive review. **International Research Journal of Modernization in Engineering, Technology and Science**, Indore, v. 3, n. 12, p. 1893-1902, 2021. DOI: <https://doi.org/10.56726/IRJMETS18081>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/383567214\\_FLOOD\\_RISK\\_ASSESSMENT\\_AND\\_UTILIZATION\\_OF\\_AHP\\_IN\\_FLOOD\\_MAPPING\\_A\\_COMPREHENSIVE\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/383567214_FLOOD_RISK_ASSESSMENT_AND_UTILIZATION_OF_AHP_IN_FLOOD_MAPPING_A_COMPREHENSIVE_REVIEW). Acesso em: 22 set. 2024.

SCHWANTZ, D. FEITOSA, J. R. T. Os procedimentos de geoprocessamento aplicado ao planejamento da gestão pública. **Revista Farol**, Vitória, v. 17, n. 17, p. 140-157, nov. 2022. Disponível em: <https://revista.farol.edu.br/index.php/farol/article/view/403/254>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SERGIPE. Secretaria de Estado do Meio Ambiente, Sustentabilidade e Ações Climáticas - Semac. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju: SEMAC, 2024.

SETIANTO, A.; TRIANDINI, T. Comparison of kriging and inverse distance weighted (IDW) interpolation methods in lineament extraction and analysis. **Journal of Southeast Asian Applied Geology**, Yogyakarta, v. 5, n. 1, p. 21-29. 2013. DOI: <https://doi.org/10.22146/jag.7204>. Disponível em: <https://jurnal.ugm.ac.id/jag/article/view/7204>. Acesso em: 07 out. 2024.

SILVA, C. A.; NUNES, F. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais [...]** São José do Campos: INPE, 2009. p. 5435-5442.

SILVA, I. L.; RODRIGUES, T. C. S.; FERNANDES, H. G. P. Monitoramento, por meio de geotecnologias, dos processos de inundação e alagamento na Bacia Hidrográfica do Rio do Bacuri, Imperatriz-MA. **Geofronter**, Campo Grande, v. 10, p. 01-19, 2024. DOI: <https://doi.org/10.61389/geofronter.v10.8305>. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/GEOF/article/view/8305>. Acesso em: 15 jan. 2025.

SILVA, G. M.; VIEIRA, A. F. S. G.; ALVES, A. C. Análise da ocupação da terra em área de risco: um estudo de caso no bairro Nova Cidade, Manaus- AM. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 33, n. 72, p. 93-109, 2023.

SILVA JUNIOR, M. A. B. da *et al.* Desafios para a adaptação da infraestrutura de drenagem urbana em cenário de mudança do clima no Recife-PE. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 5, n. 3, p. 302-318, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.24221/jeap.5.3.2020.3025.302-318>. Disponível:

<https://www.journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/3025/0>. Acesso em: 03 dez. 2024.

SOUZA JÚNIOR, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, Basel, v. 12, n. 17, p. 1 - 27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735>. Acesso em: 07 set. 2024.

TURINI, L. R. *et al.* Gestão integrada dos sistemas de esgotamento sanitário e drenagem urbana. **Geoambiente On-line**, Jataí, n. 51, p. 182-205, 2025. Disponível em: <https://revistas.ufj.edu.br/geoambiente/article/view/76993>. Acesso em: 01 fev. 2025.

VIEIRA, M. R. S. *et al.* Mapeamento de áreas de risco a inundação com imagens Alos Palsar: estudo de caso em Belém (PA). **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 16, n. 40, p. 47-63, jan./abr. 2022. Disponível em: <https://revista.ufr.br/actageo/article/view/6749>. Acesso em: 15 dez. 2025.

WAND, M.P.; JONES, M.C. **Kernel smoothing**. New York: Chapman & Hall/CRC, 1995.

WOLLMANN, C. A. Revisão teórico-conceitual do estudo das enchentes nas linhas de pesquisa da geografia física. **Revista Eletrônica Georaguaia**, Barra dos Garças, v. 5, n.1, p. 27- 45, jan./jul. 2015. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/4914/pdf>. Acesso em: 13 ago. 2024.

ZHONG, J.; LI, D.; JIANG, K. Assessment of urban underground spaces inundation during extreme rainfall events. **Water Science & Technology**, London, v. 89, n. 11, p. 2851-2866, 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.165>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/89/11/2851/102411/Assessment-of-urban-underground-spaces-inundation> . Acesso em: 01 out. 2024.