

# A suscetibilidade às inundações em extremos climáticos: o papel da morfologia urbana revelado por análise multicriterial

*Susceptibility to flooding in climatic extremes: the role of urban morphology revealed by multicriteria analysis*

*Susceptibilidad a inundaciones en extremos climáticos: el papel de la morfología urbana revelado por análisis multicriterio*

---

**Maria Eduarda Barbosa da Veiga** 

Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande (PB), Brasil.

**Matheus Batista Simões** 

Universidade Federal de Pernambuco; Centro de Artes; Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano. Recife (PE), Brasil.

**Mauro N. Macêdo Barros Filho** 

Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande (PB), Brasil.

**Carlos de Oliveira Galvão \*** 

Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Campina Grande (PB), Brasil. carlos.o.galvao@gmail.com

\* Autor correspondente.

---

## CRediT

**Contribuição de autoria:** Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Software; Validação; Visualização; Redação – rascunho original; Redação – revisão e edição: VEIGA, M. E. B.; SIMÕES, M. B.; Concepção; Análise; Metodologia; Supervisão; Redação - revisão e edição: BARROS FILHO, M. N. M.; GALVÃO, C. O.

**Conflitos de interesse:** Os autores certificam que não há conflito de interesse.

**Financiamento:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

**Aprovação ética:** Os autores certificam que não houve necessidade de aprovação de Comitê de Ética.

**Uso de I.A.:** Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do trabalho.

**Editores responsáveis:** Daniel Sant'Ana (Editor-Chefe); Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes (Editor Convidado); Sílvia Roberto Magalhães Orrico (Editor Convidado); Thiago Alberto da Silva Pereira (Editor Convidado); Livia Santana (Editora Convidada); Victor Itonaga (Assistente Editorial); João Lima (Assistente Editorial).

---

## Resumo

A urbanização crescente, quando desarticulada do planejamento do uso e ocupação do solo e associada a eventos extremos de precipitação decorrentes das mudanças climáticas, pode levar a desastres como inundações e alagamentos. Este artigo propõe a utilização de análise multicriterial para produção do mapa de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos com base em métricas de morfologia urbana, com o objetivo de compreender como as diversas métricas morfológicas influenciam a geração do escoamento. O método é aplicado em uma bacia urbana com padrões morfológicos heterogêneos, localizada na cidade de Campina Grande, Paraíba. O mapa final produzido, validado por simulação hidrológica de um evento extremo, demonstrou que as métricas da morfologia urbana podem ser consideradas na formulação das estratégias de adaptação às mudanças climáticas.

**Palavras-Chave:** Hidrologia; Alagamentos; Mudanças climáticas.

## Abstract

Growing urbanization, when disconnected from land use planning and associated with extreme precipitation events resulting from climate change, can lead to disasters such as floods. This article proposes the use of multicriteria analysis to produce a map of flooding susceptibility based on urban morphology metrics, with the aim of understanding how the various morphological metrics influence runoff generation. The method is applied in an urban basin with heterogeneous morphological patterns, located in the city of Campina Grande, Paraíba. The final map, validated by hydrological simulation of an extreme event, demonstrated that urban morphology metrics can be considered in the formulation of adaptation strategies to climate change.

**Keywords:** Hydrology; Inundation; Climate change.

## Resumen

La creciente urbanización, cuando se desconecta del uso de la tierra y la planificación de la ocupación y se asocia con eventos de precipitación extrema como resultado del cambio climático, puede provocar desastres como inundaciones. Este artículo propone el uso de análisis multicriterio para producir un mapa de susceptibilidad a inundaciones basado en métricas de morfología urbana, con el objetivo de comprender cómo las diversas métricas morfológicas influyen en la generación de escorrentía. El método se aplica en una cuenca urbana con patrones morfológicos heterogéneos, ubicada en la ciudad de Campina Grande, Paraíba. El mapa final producido, validado por simulación hidrológica de un evento extremo, demostró que las métricas de morfología urbana pueden ser consideradas en la formulación de estrategias de adaptación al cambio climático.

**Palabras clave:** Hidrología; Inundación; Cambios climáticos.

## 1 Introdução

O processo de urbanização promove a ocupação do território, inclusive em áreas ambientalmente frágeis, às vezes de forma desordenada e sem planejamento. Esse processo provoca, ao mesmo tempo, a dispersão e fragmentação do tecido urbano, gerando uma descontinuidade espacial (de natureza física ou morfológica), social (comunidades que adotam lógicas de segregação) e política (atores e dispositivos de gestão e regulação urbana) (Prevot-Schapiro, 2001; Caldeira, 2000).

O setor imobiliário é um importante agente produtor do espaço urbano ao implantar arruamentos e loteamentos "ao sabor dos interesses dos capitalistas interessados, sem se inscreverem em nenhum plano conjunto" (Langenbusch, 1971, p. 137), causando sérios problemas futuros para a cidade. Para esses agentes, a preocupação de integração com os tecidos vizinhos não é uma prioridade e cabe, em muitas situações, ao Estado a função de conectar as áreas que foram implantadas de modo desconecto, provendo infraestrutura e monitorando os interstícios não urbanizados de processos de ocupação clandestina (Campos, 2008; Coelho, 2016).

Formam-se, portanto, ambientes marcados por processos de ocupação heterogêneos, diferentes padrões construtivos e impermeabilização crescente das bacias urbanas. Esses processos alteram as funções hidrológicas da paisagem que, conseqüentemente, resultam no aumento do pico, do volume de fluxo e das frequências e impactos das inundações (Aerts *et al.*, 2018; Blöschl *et al.*, 2013; Dankers *et al.*, 2014). Esses desastres vêm sendo amplamente discutidos e são reconhecidos como uma das questões científicas que devem ser tratadas como prioridade (Sarauskiene *et al.*, 2015; Deng; Xu, 2018). Além de representar ameaças às áreas urbanas, causam impactos ao ambiente e à saúde pública e, assim, devem ser tratados com uma gestão eficiente.

Uma informação usual que embasa os processos de gestão das águas urbanas são os mapas de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos. Tais mapas são interessantes porque representam a resposta hidrológica da bacia aos eventos de precipitação, ou seja, a influência da bacia sobre a geração, propagação e acumulação do escoamento em tais eventos, e também a sua vulnerabilidade. Os mapas de suscetibilidade podem ser ferramentas importantes para a formulação de políticas e estratégias de adaptação das cidades às mudanças climáticas, tanto para a gestão de áreas já urbanizadas como para o planejamento de áreas em processo de ocupação. Esses mapas são construídos através de modelos numéricos de simulação hidrológica e hidráulica. Entretanto, para muitas áreas nas cidades, incluindo os assentamentos informais e precários, há escassez de dados hidrométricos, de uso do solo e de características hidrológicas e hidráulicas que possam embasar as simulações. Neste contexto, uma alternativa é a construção desses mapas a partir de informações prontamente disponíveis em acervos públicos e por sensoriamento remoto.

Em particular, destacam-se estudos que investigaram a suscetibilidade às inundações e aos alagamentos em bacias hidrográficas, através de métricas hidrológicas (Pinto *et al.*, 2016; Ahmed; Hewa; Alrajhi, 2021; Azareh *et al.*, 2021). Entretanto, pouca atenção tem sido dada à influência da morfologia urbana na suscetibilidade em bacias marcadamente urbanizadas. Os estudos sobre o papel da morfologia urbana sobre o desenvolvimento urbano sustentável não têm considerado as inundações e os alagamentos (*e.g.*, Barau *et al.*, 2015; Dadashpoor; Azizi; Moghadasi, 2019).

A hipótese levantada neste artigo é que a morfologia urbana, descrita por métricas específicas, pode ser relacionada aos mapas de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos, podendo, assim, informar aos planejadores e gestores como e onde intervir na gestão urbana de modo a atenuar os impactos da acentuação dos eventos extremos de precipitação decorrentes das mudanças climáticas. Especificamente, tenta-se responder às seguintes perguntas: como a morfologia urbana influencia a suscetibilidade às inundações e aos alagamentos dos assentamentos urbanos? Quais métricas morfológicas são mais influentes e em que contextos? Explicitar o relacionamento entre as métricas morfológicas de uma área urbana e a geração, propagação e acumulação do escoamento é um desafio metodológico particularmente interessante. Neste artigo, propõe-se utilizar a análise multicriterial espacial, tendo critérios morfológicos urbanos e hidrológicos como potenciais determinantes da suscetibilidade às inundações e aos alagamentos, tendo como referência cenários de alagamentos produzidos por simulação numérica hidrológica-hidráulica. O método proposto é aplicado a uma pequena bacia urbana, caracterizada por ocupação heterogênea e distintos padrões morfológicos, na cidade de Campina Grande, Paraíba.

## 2 Morfologia urbana e inundações

A morfologia urbana é determinada pelos contextos históricos e espaciais de consolidação e, por isso, tem influência na intensidade dos fenômenos ligados à natureza urbana (Bogo, 2020). Além disto, é importante destacar a interconexão existente entre a cidade como um palco social e político e sua formação física. Assim, se recorre a diferentes conceitos e métodos da morfologia para melhor interpretar a composição urbana (Rego; Meneguetti, 2011; Monteiro *et al.*, 2020).

A produção do espaço urbano, bem como seus desdobramentos sobre a morfologia urbana, engloba os conflitos provenientes da relação entre a ocupação e os ciclos naturais, uma vez que as ações dos atores sociais são interações estratégicas que visam institucionalizar e assegurar os processos de delimitação, retirada e uso dos recursos. Por exemplo, as alterações na cobertura do solo a partir da impermeabilização modificam o ciclo hidrológico e geram as enchentes, alagamentos e inundações nas áreas urbanas.

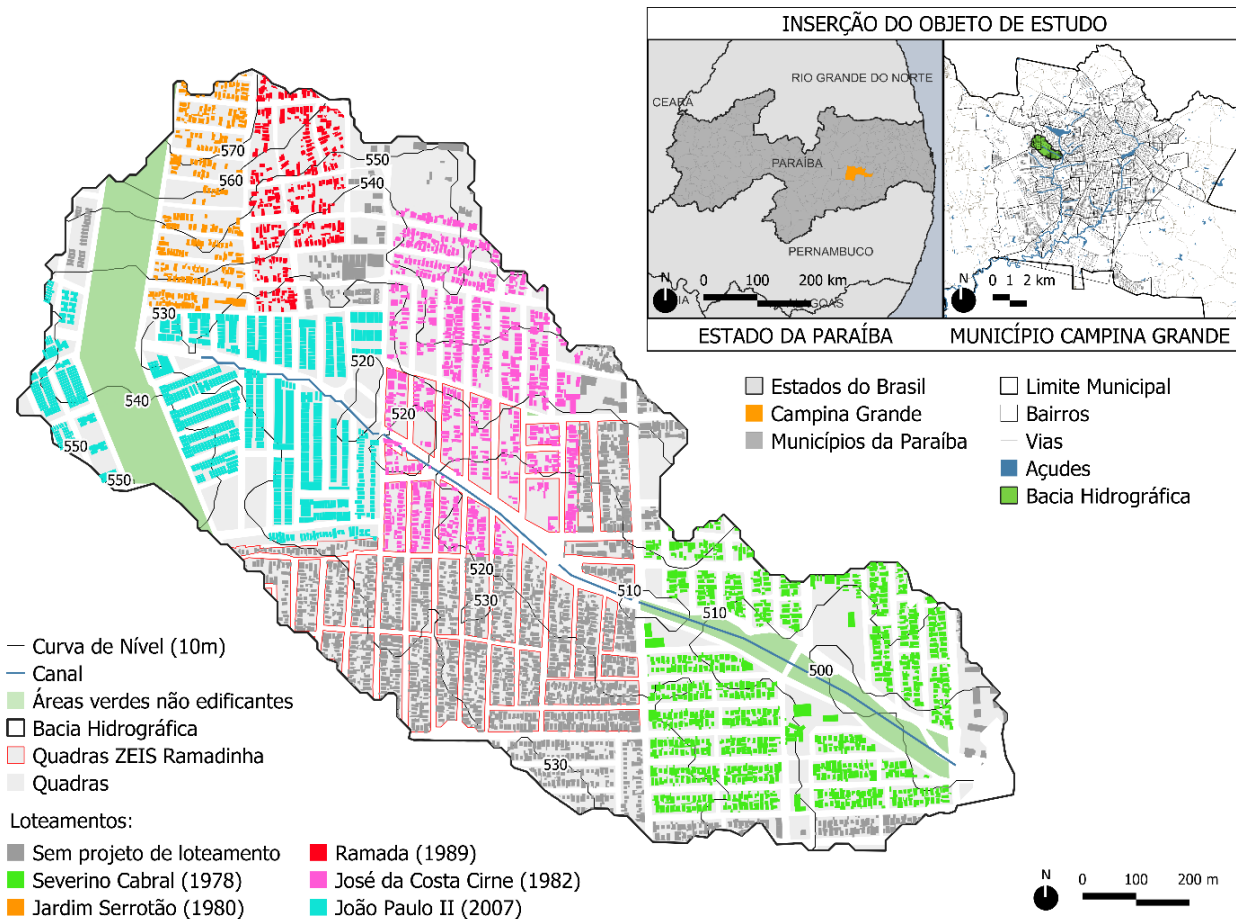
Usualmente, as terminologias enchente, inundação e alagamento são tratadas como sinônimos, porém representam distintos processos da ocupação das águas no espaço do leito de um rio, margens ou encostas. Na literatura alguns estudos descreveram esses fenômenos hidrológicos (Marcelino, 2007; Hammond *et al.*, 2015), definindo enchente ou cheia como o temporário aumento do nível de água do canal devido ao aumento da vazão, sem extravasar, limitando-se à cota máxima do canal; inundação como o transbordamento das águas de um curso d'água, invadindo a planície de inundação; e alagamento como o acúmulo momentâneo de águas em determinados locais, que podem ou não serem áreas de ocorrência de precipitação, por problemas de drenagem

## 3 Área de estudo

A área de estudo consiste na bacia hidrográfica da Ramadinha (Figura 1), na cidade de Campina Grande, Paraíba, com 129 hectares, dos quais cerca de 30% são ocupados por uma das Zonas Especiais de Interesse Social (ZEIS) do município, chamada de Invasão Ramadinha II. Além da vulnerabilidade social e incidência de habitações precárias, a

bacia apresenta carência de infraestrutura e equipamentos públicos, além da ocorrência de lotes irregulares. A urbanização nesta bacia esteve em expansão nas décadas de 1970 e 1980, através de loteamentos com diferentes configurações de renda. Apesar do ordenamento territorial municipal, responsável por validar os projetos de loteamentos na área da bacia, a ocupação não escapou a processos de ocupação desordenada, através da clandestinidade e irregularidade.

**Figura 1:** Localização e caracterização da Bacia da Ramadinha.



Fonte: Editado de Base Cartográfica Municipal (2010).

A bacia abrange cinco loteamentos e uma área ocupada sem qualquer projeto de loteamento. Nesta última, a maioria das quadras está inserida na poligonal da ZEIS Ramadinha (nomeadamente, ZEIS Invasão Ramadinha II). Esta zona é reconhecida como precária pelo município, sendo classificada como ZEIS do Tipo 1 que, segundo a Lei Municipal nº 4.806, são “áreas ocupadas por assentamentos precários de população de baixa renda, podendo o poder público promover a regularização fundiária e urbanística, com implantação de equipamentos públicos, inclusive de recreação e lazer, comércio e serviços de caráter local”.

O loteamento Severino Cabral (1978), executado pela Companhia de Habitação Popular (CEHAP), é o mais antigo e teve uma ocupação gradativa após a construção das habitações. Essa constatação é perceptível através da consulta a imagens de sensoriamento remoto disponibilizadas pelo Google Earth e se repete nos loteamentos José da Costa Cirne (1982) e no mais atual, João Paulo II (2007). Já nos loteamentos Jardim

Serrotão (1980) e Ramada (1989), percebe-se que havia ocupações anteriores ao projeto que se adaptaram à reestruturação do território. Além disso, ressalta-se que, até o ano de 2010, os loteamentos Jardim Serrotão (1980), Ramada (1989) e José da Costa Cirne (1982) não possuíam ruas pavimentadas, intervenção que só é perceptível nas imagens de sensoriamento remoto após 2018, mais de 20 anos após a aprovação desses loteamentos. Após os anos 2000, a redução do tamanho do lote marcou a produção imobiliária que, movida pela maximização do uso do solo e, conseqüentemente, do lucro, somou a redução da permeabilidade do solo com a ausência de recuos e quadras inteiras edificadas com residências geminadas.

As datas aqui associadas aos projetos de loteamento são referentes ao ano no qual o projeto foi aprovado e não ao seu processo de ocupação, que pode ter ocorrido de modo gradativo após a execução do loteamento ou até mesmo anterior ao projeto, com edificações dispostas de modo espontâneo que se adequaram ao loteamento ao longo do tempo.

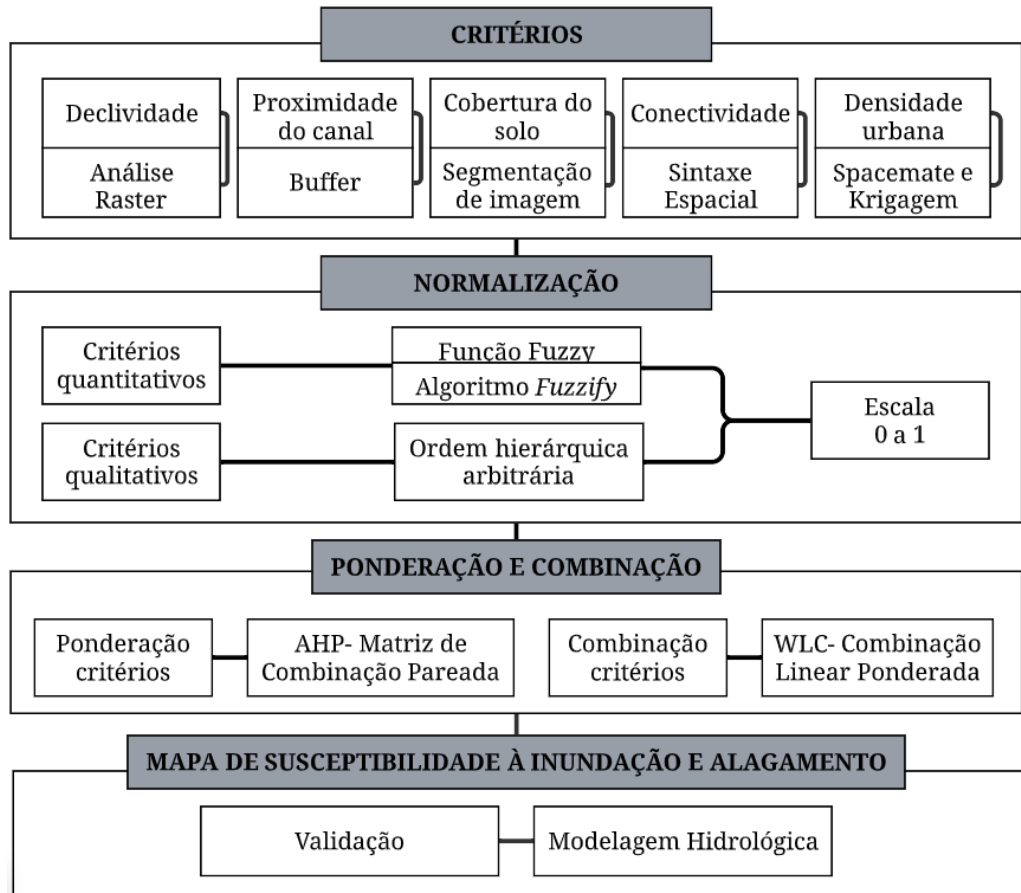
Diante disso, o corpo hídrico, o Riacho Ramadinha, comporta-se como um limite que adentra loteamentos com padrões heterogêneos do ponto de vista socioespacial. Em sua extremidade Leste, no loteamento Severino Cabral (Figura 1), encontra-se canalizado e contido em um espaço livre estabelecido a partir dos limites de 15 metros de área não edificante (Lei Nº 6.766/79). Ao avançar para o Oeste e adentrar na ZEIS, as moradias dispõem-se de modo mais denso em relação à maioria dos loteamentos vizinhos. Em determinados locais, algumas moradias adentram o limite de 15 metros do corpo hídrico, em trechos marcados por vias não pavimentadas e pela falta de infraestrutura.

A canalização de parte do riacho foi produto de intervenções do Programa de Aceleração do Crescimento - Urbanização de Assentamentos Precários (PAC-UAP) na região (Moraes *et al.*, 2021), no entanto nunca foi concluída, especialmente na área da ZEIS Ramadinha. Os elementos de microdrenagem se localizam, principalmente, a jusante das ruas transversais ao canal, como garantia de direcionamento das águas ao curso d'água.

## 4 Metodologia

A elaboração do cartograma de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos foi realizada a partir de uma análise multicriterial, utilizando o processo hierárquico analítico (do inglês, *Analytic Hierarchy Process* – AHP) (Saaty, 1987) e a Lógica *fuzzy*, com a padronização das camadas escolhidas para execução da combinação linear ponderada (Figura 2). O AHP aborda o processo de escolha estruturado em níveis hierárquicos por composição de objetivos, critérios, subcritérios e alternativas. Assim, os elementos avaliados são comparados entre pares para ser aferida a preferência ou influência relativa em função de cada elemento do mesmo nível, sendo assim produzidos os pesos que definirão a hierarquização das alternativas. Para utilizar o método AHP na tomada de decisão, Saaty (2008) propõe quatro etapas: (i) identificar o problema na pesquisa e estabelecer a hierarquia da tomada de decisão; (ii) construir um conjunto de matrizes para comparar os dados entre os níveis superiores e inferiores; (iii) comparar as definições de peso entre as prioridades obtidas; e (iv) utilizar a escala digital de intensidade para definir as prioridades. O AHP já foi usado em estudos de suscetibilidade à inundações, mas não com o mesmo objetivo que o presente (e.g., Nachappa *et al.*, 2020; Alves *et al.*, 2018).

**Figura 2:** Fluxograma metodológico.



#### 4.1 Critérios

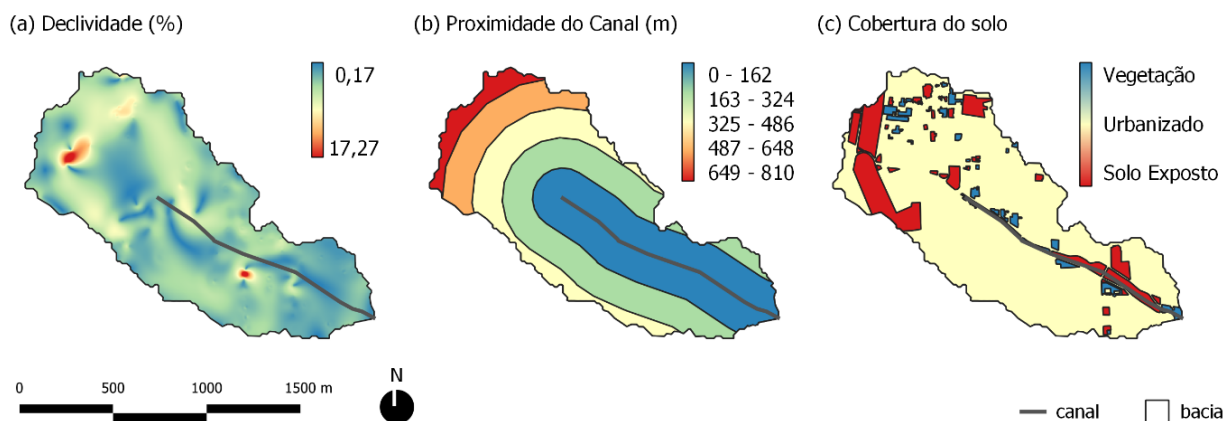
Os critérios da morfologia urbana para a análise multicriterial foram selecionados com base na relevância à suscetibilidade às inundações e aos alagamentos. Os critérios selecionados, com as respectivas descrições, estão apresentados no Quadro 1.

Os dois primeiros critérios (declividade do terreno e proximidade ao canal) foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo (Figura 3). Já para a delimitação do mapa de cobertura do solo, foi utilizada uma imagem de alta resolução do Google Earth e o Google Street View, com os quais foi possível distinguir os diferentes tipos de ocupação. A declividade se configura como o desnível do terreno em relação à sua projeção horizontal. O mapa da Figura 3(a) mostra os valores encontrados na área de estudo. A proximidade do canal foi obtida por análise de proximidade por áreas de influência, geradas para 162, 324, 486, 648 e 810 metros de distância das margens do corpo hídrico (Figura 3b). Já o mapa de cobertura do solo foi elaborado a partir da classificação visual de objetos gerados pela segmentação de uma imagem em alta resolução (Figura 3c).

**Quadro 1:** Critérios utilizados na análise multicriterial.

Critérios	Relação com o funcionamento hidrológico	Fontes
Declividade do terreno	A declividade interfere na capacidade de infiltração, uma vez que as áreas com maior declividade possuem menor capacidade de infiltração do que as mais planas. Assim, influencia diretamente no acúmulo de água no terreno, além de ser um dos principais fatores responsáveis pela ocorrência e velocidade do escoamento superficial. Por isso, esse critério se correlaciona numericamente de forma inversa com a propensão e magnitude de alagamentos, sendo medido a partir das curvas de nível do terreno.	Dalfi <i>et al.</i> (2013) Jalayer <i>et al.</i> (2014) Oliveira e Vieira (2009) Mendes <i>et al.</i> (2020)
Proximidade do canal	Nas proximidades com os rios urbanos, maior torna-se a suscetibilidade às inundações, devido ao extravasamento dos próprios canais em eventos de cheia. Assim, mediante cenários de fortes chuvas e aumento do nível de água, o extravasamento pode ocorrer para os terrenos adjacentes em rios de vale, uma vez que a proposição não é aplicável para rios de planalto.	Goerl, Michel e Kobiyama (2017) Cunha <i>et al.</i> (2017) Seabra e Rocha-Leão (2019) Oliveira, Silva e Nascimento (2019)
Cobertura do solo	A cobertura do solo está associada com o ciclo hidrológico, ligada à rugosidade e à permeabilidade da superfície. Nesse sentido, o critério intervém de forma significativa no regime do escoamento superficial e da infiltração.	Luiz e Romão (2019) Neves <i>et al.</i> (2019) Moura <i>et al.</i> (2019)
Conectividade	Vias mais conectadas recebem mais águas a montante e, portanto, registram valores superiores de escoamento, muito embora promovam melhor distribuição das ondas de cheia.	Gil e Steinbach (2008) Esposito e Di Pinto (2014) Ahmed, Meenar e Alam (2019) Morelli e Cunha (2019)
Densidade Urbana	O aumento da densidade promove o aumento das áreas impermeáveis e consequente geração do escoamento, para escala de análise de uma área urbana já ocupada.	Motta Jr. e Tucci (1984)

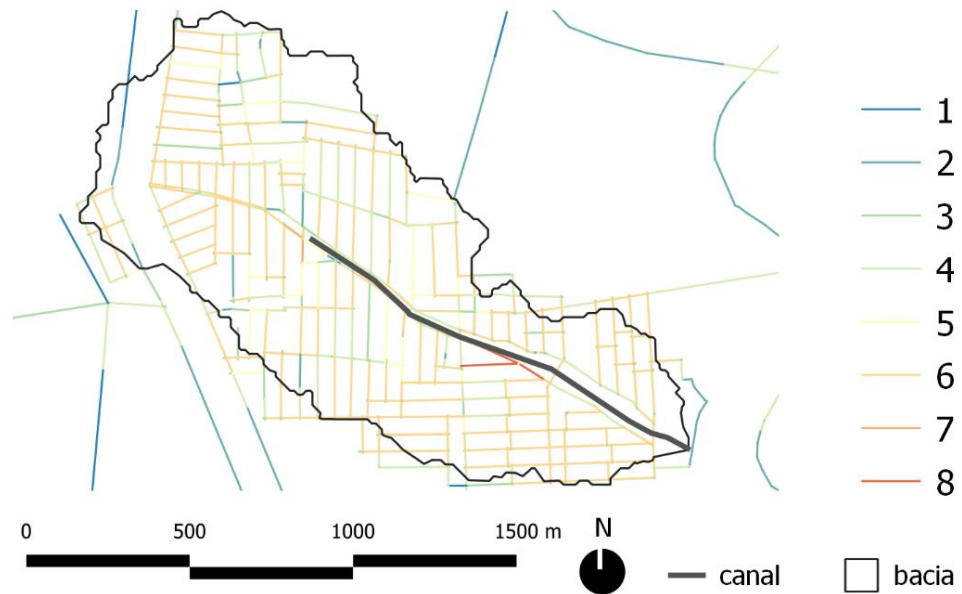
**Figura 3:** Critérios hidrológicos.





A conectividade é definida pelo número de conexões diretas de uma via com as demais vias de uma rede, de forma que quanto maior esse número, maior o seu valor de conectividade (Rismanchian; Bell, 2011). Este critério está fundamentado na Teoria da Sintaxe Espacial, a qual busca entender a relação entre a configuração espacial e o comportamento social, em especial os fluxos de pessoas (Hillier e Hanson, 1984). Os resultados podem ser interpretados pela gradação de cores, desde o vermelho, que simboliza a alta conectividade, até o azul, que simboliza a baixa conectividade em uma rede (Figura 4). A medida de conectividade entre as vias foi analisada com a ajuda do software DepthMap e os resultados obtidos foram apresentados em formato *raster*.

**Figura 4:** Critérios de conectividade.



A densidade urbana requer, inicialmente, uma definição, pois este termo está inserido dentro de um espectro de diferentes relações, tais como densidade demográfica, habitacional e construtiva. Assim, o seu valor absoluto não é capaz de representar a totalidade da forma urbana (Berghauser Pont; Haupt, 2005; Cavalcanti; Mendes; Barros Filho, 2022). Neste trabalho, a densidade calculada é de natureza construtiva, classificada com base nas características geográficas e de ocupação de cada contexto urbano. O método de obtenção do critério combina diversos índices urbanísticos que influenciam a densidade construtiva, tais como: Taxa de Ocupação (GSI – *Ground Space Index*), Índice de Aproveitamento (FSI – *Floor Space Index*) e Número Médio de Pavimentos (L – *Levels*). Segundo Berghauser Pont e Haupt (2005), cada índice não é capaz de representar a qualidade do espaço urbano gerado e essa metodologia combina os diversos índices, sendo uma das mais inovadoras, pois representa a densidade não como apenas um valor métrico, mas de forma multivariada.

A taxa de ocupação (GSI – *Ground Space Index*) consiste na razão entre o espaço construído e o não construído, calculado pela razão da área útil (Bx) da edificação sobre a área de agregação (Ax) do espaço não edificado tido como referência. Nesse indicador, leva-se em consideração como área útil da edificação apenas a área do pavimento térreo. Já o índice de aproveitamento (FSI – *Floor Space Index*) considera a área bruta de piso da edificação, ou seja, a soma da área de todos os pavimentos sobre a área de agregação

( $A_x$ ) do espaço não edificado tido como referência. O Número Médio de Pavimentos ( $L - Levels$ ) é dado pela razão entre o GSI e o FSI.

O OSR (*Open Space Ratio*), também conhecido como Índice de Espaços Abertos, é um indicador derivado do GSI e FSI e indica a pressão da área construída sobre os espaços livres (*Spaciouness*). De acordo com este indicador, quanto maior a verticalização (FSI), menor tende a ser essa pressão. Isso se justifica pela maior racionalização no uso do solo a partir da sobreposição de lajes, resultando em uma maior quantidade de espaços livres (não construídos) que provavelmente não existiriam em caso de uma ocupação proporcional em edificações térreas. As medidas encontram-se sintetizadas no Quadro 2.

**Quadro 2:** Medidas de densidade

GSI	$GSI_x = B_x / A_x$ , Bx = área útil ( $m^2$ ), Ax = área de agregação ( $m^2$ )
FSI	$FSI_x = F_x / A_x$ , Fx = área bruta do piso ( $m^2$ ), Ax = área de agregação ( $m^2$ )
L	$L = FSI_x / GSI_x$
OSR	$OSR = (1 - GSI_x) / FSI_x$ , adimensional

Fonte: Berghauser Pont e Haupt (2005).

Neste trabalho, considerou-se, no cálculo dos indicadores como área de agregação, a soma da área das quadras dos diferentes projetos de loteamentos inseridos na bacia e, na discussão dos resultados, levou-se em consideração o ano no qual cada loteamento foi executado, bem como suas condicionantes socioespaciais, a fim de analisar as diferenças no modo de ocupação ao longo do tempo.

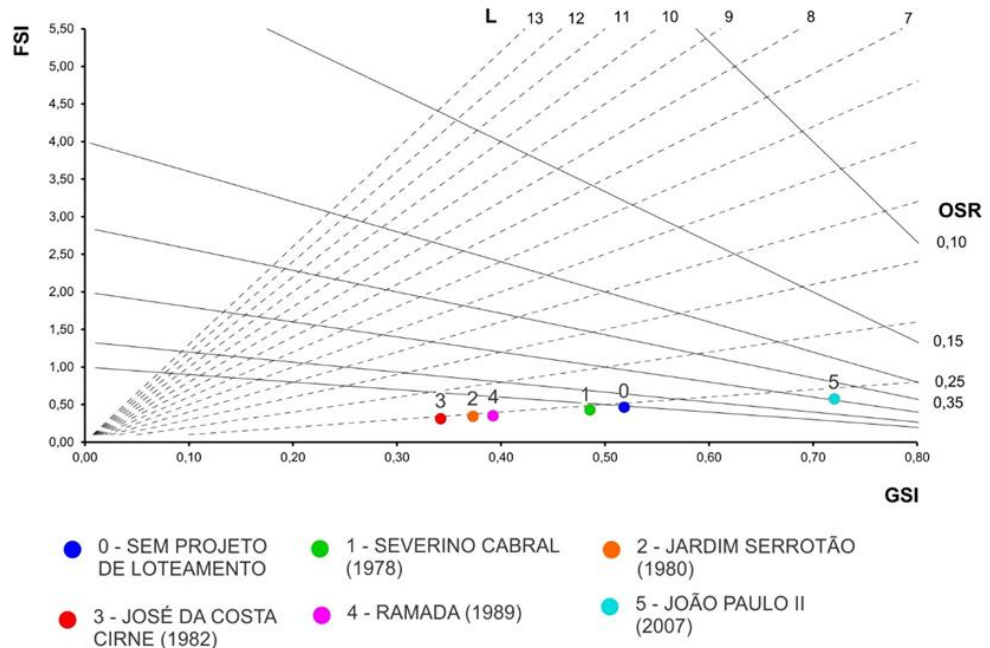
No cálculo da densidade de cada loteamento foram excluídas as quadras não ocupadas e quadras não edificantes segundo a Lei de Parcelamento do Solo N° 6.766/79. Nessa bacia, tem-se duas áreas não-edificantes, sendo uma o próprio espaço livre adjacente ao corpo hídrico, e outra uma grande área a oeste, que abriga uma rede de transmissão de alta tensão.

A partir do gráfico da Figura 5, é possível aferir os indicadores de densidade. Estes são agrupados em um espaço tridimensional chamado *Spacematrix* que, por sua vez, é planejado e gera o gráfico *Spacemate*, composto pelos dois eixos dos índices GSI e FSI, derivando mais dois índices, o Número Médio de Pavimentos (L) e a Pressão sobre Espaços Livres (OSR).

A partir do gráfico, é possível aferir que os pontos apresentam maior variação horizontal. Assim, a característica que, majoritariamente, distingue os assentamentos presentes na bacia é a taxa de ocupação das edificações (GSI), representada na Figura 6. As variações do índice de aproveitamento (FSI), média de gabaritos (L) e pressão sobre o espaço livre (OSR) são incipientes. Assim, a análise de densidade para esta bacia foi realizada partir do GSI, uma medida independente que tem elevada influência no funcionamento hidrológico (Quadro 1). Os valores de GSI obtidos na análise de densidade foram interpolados através do método *Kriging*, baseado na definição prévia de uma função contínua que estima o comportamento de uma variável em diversas direções no espaço, ou seja, avalia o nível de similitude dos valores à medida que se afastam (Gallardo, 2006).

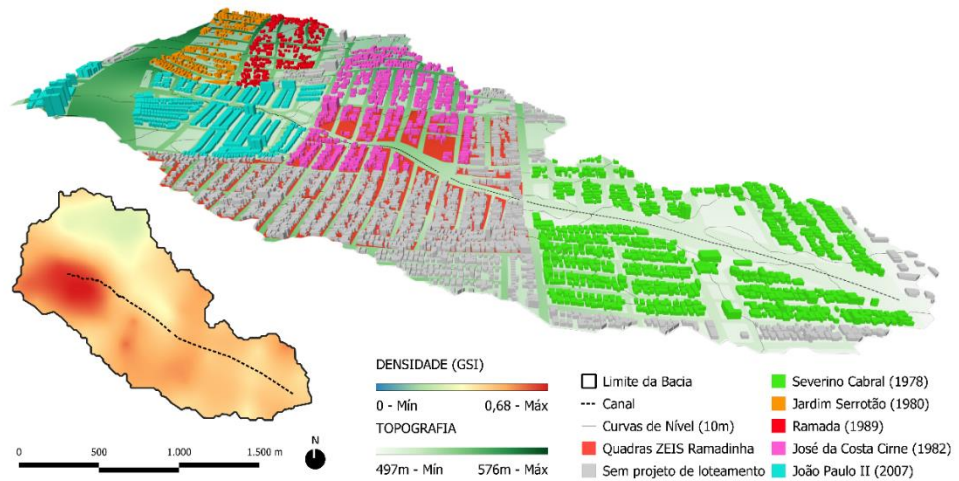
O *Kriging* foi baseado em um semivariograma esférico, pois gerou as melhores estimativas para a variável.

**Figura 5:** Espacialização dos padrões de ocupação dos loteamentos no *Spacemate*.



Fonte: Autores, a partir de Berghauser Pont e Haupt (2005).

**Figura 6:** Critério de densidade.



Os mapas finais, de todos os critérios, foram gerados com tamanho de pixel equivalente a dois metros, visando a análise de pixel a pixel utilizada para sobreposição das camadas.

## 4.2 Padronização dos critérios

Como cada um dos critérios possui diferentes escalas e dimensões, se requer a padronização para o processo de combinação. Assim, para o critério cobertura do solo, de natureza qualitativa, aplicou-se uma ordem hierárquica arbitrária, pela qual cada classe é associada a um valor numérico (Tabela 1). O processo de padronização dos demais critérios foi procedido a partir da extensão SAGA do QGIS, para cálculos de *raster*

no *toolbox* de processamento, com o algoritmo *Fuzzify*. Este traduz os valores da grade em conjunto de membros *fuzzy* como preparação para análise via Lógica *fuzzy*. O critério de densidade não necessitou de padronização, por ser uma medida adimensional que delimita-se na faixa requerida (0 a 1); os demais têm suas funções membro do algoritmo descritas no Quadro 3. Os mapas com os valores padronizados dos critérios estão apresentados na Figura 7.

**Tabela 1:** Ordem hierárquica arbitrária de cobertura do solo.

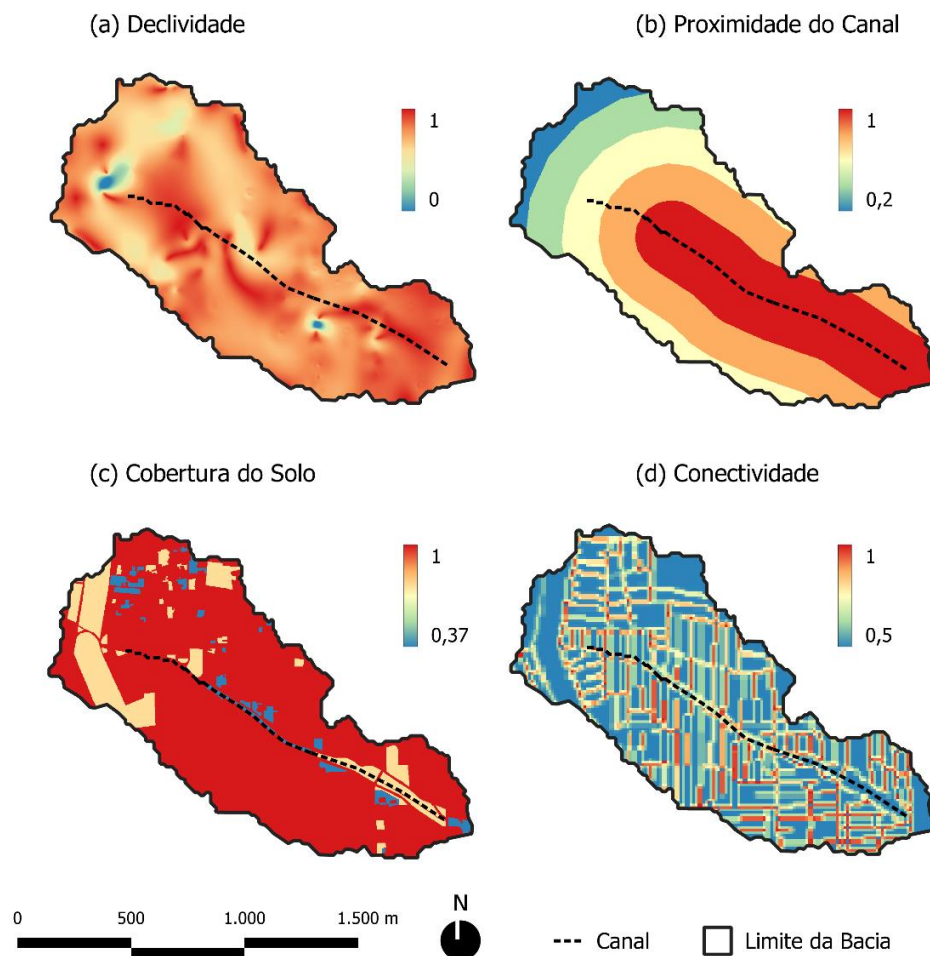
Classes de Cobertura do Solo	Importância
Vegetação	0,37
Solo Exposto	0,75
Urbanizado	1,00

Fonte: Autores adaptado de Falcão (2013).

**Quadro 3:** Função membro usada para cada camada.

Critério	Função membro
Declividade	Diminuição linear
Proximidade do canal	Diminuição linear
Conectividade	Aumento linear

**Figura 7:** Critério de densidade.



### 4.3 Comparação, ponderação e combinação de critérios.

A comparação entre pares foi realizada utilizando uma escala linear de 1 a 9, descrita no Quadro 4 (Saaty, 1987; Saaty, 2008).

**Quadro 4:** Comparações entre pares no AHP.

Valor	Definição	Descrição
1	Igual importância	Duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma alternativa em relação à outra
5	Importância forte	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação à outra
7	Importância muito forte	Uma alternativa é favorecida muito fortemente em relação à outra
9	Importância extrema	A evidência favorecendo uma alternativa em relação à outra é da mais alta ordem possível de afirmação
2,4,6,8	Valores médios	São atribuídos para indicar valores de compromisso de importância.

Fonte: Adaptado de Saaty (1987) e Saaty (2008).

Portanto, a partir dos valores estabelecidos na comparação, monta-se a matriz A, denominada de Matriz de Comparação Pareada (MCP), com  $n$  alternativas, conforme demonstrado na Equação 1. Nela,  $a_i$  e  $a_j$  representam os critérios, e o termo  $a_{ij}$  a comparação pareada destes. Admite-se que a matriz não possui inconsistências, uma vez que  $a_{ij} = a_{ji}^{-1}$  para qualquer índice.

$$A = [a_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 1/a_{12} & \dots & 1/a_{1n} \\ a_{12} & 1 & \dots & 1/a_{2n} \\ \vdots & \vdots & 1 & \vdots \\ a_{1n} & a_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

O  $\lambda_{\text{máx}}$  é o principal autovalor de A, que pode ser obtido pela Equação 2, na qual  $w$  se refere ao vetor de pesos das alternativas. Desta forma, a matriz de autovetores, quociente da soma da linha pela soma dos elementos da matriz, é multiplicada pela matriz A, e assim é obtido o vetor dos autovalores pela divisão entre este produto vetorial e os autovetores. Em seguida, é calculado o Índice de Consistência (IC) – detalhado na Equação 3 – para a obtenção da Razão de Consistência (RC), calculada pela Equação 4. O parâmetro RC se faz necessário para avaliar a consistência lógica da matriz e, conforme Saaty (1987), o valor deve ser igual ou inferior a 0,1. A operacionalização deste processo foi realizada a partir da calculadora de *raster* do QGIS.

$$A * w = \lambda_{\text{máx}} * w \quad (2)$$

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (4)$$

Em sequência, o AHP foi aplicado no QGIS utilizando uma ferramenta de Combinação Linear Ponderada (WLC), (Santos; Louzada; Eugenio, 2010). O WLC do mapeamento de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos é dado na Equação 5.

$$WLC = \left( \sum_{i=1}^n W_i X_i \right) \quad (5)$$

Onde  $W_i$  é o peso relativo derivado do AHP de importância para a camada  $i$  do mapa, e  $X_i$  representa a camada  $i$  do mapa normalizado.

Posteriormente, foi gerada uma imagem com atributos, que variam de 0 a 1, correspondentes aos valores mais baixos (0) e aos mais altos (1) de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos.

A construção da MCP para o caso consistiu na determinação da ordem de importância dos critérios. Uma primeira estimativa dos pesos foi baseada em premissas teóricas (Quadro 1), estudos correlatos, julgamento dos pesquisadores e demais trabalhos desenvolvidos no âmbito da área de estudo (Santos, 2021; Machado *et al.*, 2021; Alves *et al.*, 2022). Em seguida, um ajuste dos pesos foi realizado usando os resultados da simulação hidrológica de um evento extremo de chuva, que gerou os correspondentes locais de alagamento na bacia (Alves *et al.*, 2022). Os pesos da MCP foram ajustados até que os locais de maior suscetibilidade aos alagamentos gerados pelo AHP correspondessem aos locais de alagamentos da simulação hidrológica. O modelo hidrológico utilizado foi o *Stormwater Management Model* (SWMM), um modelo dinâmico chuva-vazão para simulação do escoamento superficial em bacias urbanas, o qual usa o método da Curva Número do *Soil Conservation Service* (SCS) dos Estados Unidos.

Por fim, foi realizada uma análise de sensibilidade para compreender quão sensível é o mapa de suscetibilidade a cada critério. Na literatura destacam-se alguns métodos de análise de sensibilidade para o AHP, tais como a análise Monte Carlo, métodos de regressão ou correlação, método OAT (“*One At a Time*”), entre outros (Saltelli *et al.*, 2000). Alguns métodos realizam a manipulação dos pesos, com a atribuição do mesmo peso para todos os critérios AHP e/ou com a remoção de alguns critérios específicos (Moradi *et al.*, 2020). A remoção do critério, ou sua atribuição com peso zero, é seguida de uma nova ponderação da combinação pareada. Neste trabalho, aplicou-se a remoção dos critérios buscando atendimento a dois aspectos: o primeiro, à identificação dos critérios que são especialmente sensíveis às alterações no peso; e o segundo, à visualização da dinâmica da mudança espacial.

## 5 Resultados e discussão

A análise hierárquica do processo resultou em uma matriz pareada de razão de consistência (RC) igual a 0,098, considerando o ajuste final dos pesos auxiliado pela modelagem hidrológica; portanto, tem-se a indicação de que a comparação por pares foi aceitável. O procedimento resultou em um  $\lambda_{máx}$  de 5,43 e IC de 0,109. A relativa importância dos critérios é mostrada na Tabela 2, a partir da qual foi possível identificar quais métricas de morfologia urbana possuem maior influência na suscetibilidade às inundações e aos alagamentos na bacia (Tabela 3).

**Tabela 2:** Matriz de comparação pareada dos critérios.

<b>Critério</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>	<b>C5</b>
C1	1	1/5	1/5	1/6	1/6
C2	5	1	1/2	1/3	1/4
C3	5	2	1	1/2	1/5
C4	6	3	2	1	1/2
C5	6	4	5	2	1

Onde: C1 (Proximidade do Canal); C2 (Cobertura do Solo); C3 (Declividade); C4 (Conectividade); e C5 (Densidade).

**Tabela 3:** Pesos AHP.

<b>Critérios</b>	<b>Pesos</b>
Proximidade do Canal	0,04
Cobertura do Solo	0,15
Declividade	0,18
Conectividade	0,26
Densidade	0,37

O critério de Proximidade do Canal (C1) apresenta menor importância na comparação, pois a bacia possui um elemento de macrodrenagem com capacidade hidráulica para chuvas de mais de 100 anos de período de retorno (Santos, 2021). Assim, a suscetibilidade nas proximidades deste é reduzida devido à improbabilidade de ocorrência do transbordamento do canal, mesmo para eventos extremos.

É seguido pela cobertura do solo (C2) que, apesar de possuir um maior peso em relação a C1, ainda é o segundo critério com menor importância devido à uniformidade da cobertura do solo ao longo da bacia. Mesmo que seja um fator determinante à impermeabilização e geração do escoamento superficial, não existem alterações relevantes na análise de pixel a pixel, pois a bacia tem cobertura de solo majoritariamente urbanizada.

O critério de declividade (C3) possui maior importância dentre os critérios hidrológicos, pois as maiores declividades implicam em uma maior produção de escoamento para jusante. Assim, surgem zonas, como a confluência dos cursos de água ou drenos ou vias, que favorecem a ocorrência dos alagamentos. Desta forma, possui peso 0,18 dentro da combinação, uma vez que a bacia possui localidades com a mudança mais expressivas da declividade.

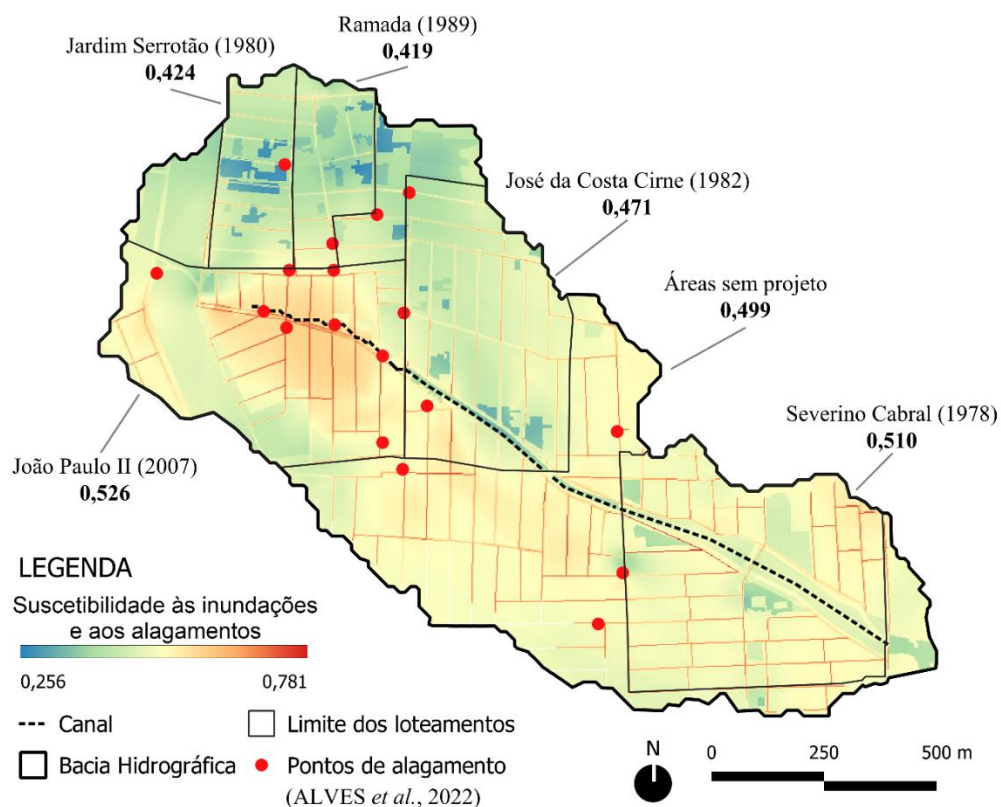
O critério de conectividade (C4) apresenta significativa importância, sobretudo porque a drenagem da bacia é majoritariamente superficial, realizada a partir dos arruamentos (Alves *et al.*, 2022). Mesmo que a área tenha diferenças na ocupação dos loteamentos, com diferentes formas de ocupação, suas vias são conectadas. Assim, as vias mais conectadas recebem uma maior onda de cheia e a conduzem para jusante, resultando em um peso de 0,26 ao critério.

Já o critério de densidade urbana (C5) é o de maior importância, uma vez que traduz a impermeabilização das quadras, a partir da taxa de ocupação do ambiente construído, considerando que o processo de ocupação altera a morfologia da bacia e o ciclo natural da água. Interessante destacar que os critérios de cobertura do solo e densidade urbana teriam papéis similares em caracterizar a influência da produção do espaço sobre a hidrologia e o acúmulo de água na bacia. Entretanto, o critério de densidade, conforme

expresso nesta análise hierárquica, é mais sensível e consegue discriminar melhor os processos de inundação e alagamento na escala pontual. Assim, é o critério que melhor responde às alterações provenientes da ocupação, e assume o peso de 0,37.

A partir dos pesos do AHP, produziu-se o mapa, cujas pontuações variaram entre 0,25 e 0,78, com valores mais altos, indicando maior suscetibilidade às inundações e aos alagamentos. Com base nestas pontuações, algumas partes da bacia hidrográfica foram classificadas como altamente suscetíveis (Figura 8). Ainda, conforme a metodologia proposta, foi calculada a média de valores de suscetibilidade para cada loteamento, a partir do cálculo de estatísticas zonais do *raster*, classificados e priorizados em termos de sua suscetibilidade às inundações e aos alagamentos (Figura 8; Tabela 4).

**Figura 8:** Mapa de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos da Bacia da Ramadinha.



**Tabela 4:** Suscetibilidade dos loteamentos às inundações e aos alagamentos.

Loteamento	Suscetibilidade (valor médio)
Sem projeto de loteamento	0,499
Severino Cabral	0,510
Jardim Serrotão	0,424
Ramada	0,419
José da Costa Cirne	0,471
João Paulo II	0,526

De posse do mapa, é possível inferir que as áreas que apresentam maior suscetibilidade são delimitadas a partir dos arruamentos, justificada pela condução das águas pluviais de forma superficial sem elementos de microdrenagem. Desta forma, as ruas com maior conexão são as que produzem maior escoamento superficial. Mesmo que essa condição



morfológica contribua significativamente com a produção do escoamento, é socialmente requerida, pois a falta de vias conectadas ainda é uma das desvantagens experimentadas em assentamentos de favelas na margem de corpos hídricos (Hatipoglu; Mahmut, 2020), tanto como espaços públicos quanto como caminhos de acessibilidade. É preciso, portanto, investir em medidas mitigadoras dos alagamentos nessas conexões, como a implantação de áreas de infiltração a montante e/ ou infraestrutura de microdrenagem nesses cruzamentos de vias.

Além da conectividade, outras métricas morfológicas são importantes na análise da sucessão de alagamentos na bacia, tais como a direção das vias em relação ao canal, evidenciada nos loteamentos de Ramada, Jardim Serrotão e nas zonas sem projeto, sobretudo na interseção com a ZEIS. Além disso, o traçado irregular nestas áreas, em conjunto com a ausência de pavimentação e de suporte aos elementos de drenagem, dificulta o controle da geração e propagação do escoamento.

A partir da análise de densidade foi verificado que os loteamentos Jardim Serrotão, José da Costa Cirne e Ramada apresentam menores taxas de ocupação (0,37; 0,34 e 0,39, respectivamente). Estes possuem quadras de maiores dimensões, com vias mais irregulares e edificações pequenas, que ora se intercalam por terrenos não ocupados, e ora apresentam grandes logradouros, criando grandes espaços não ocupados no centro das quadras. Estes fatores reduzem a suscetibilidade aos alagamentos nessas áreas, justificando menores valores médios (Tabela 4).

O loteamento Severino Cabral, por ser um dos primeiros executados e apresentar um relevo mais plano, apresenta uma taxa de ocupação maior (0,49). As quadras sem projeto de loteamento, contidas majoritariamente na ZEIS Ramadinha, apresentam uma taxa de ocupação ainda maior (0,52). Além disso, percebe-se uma rotação na disposição das quadras, arranjadas majoritariamente de modo perpendicular ao riacho que, devido às particularidades topográficas, favorece uma maior quantidade de vias com maior declividade, fato este também constatado nos loteamentos José da Costa Cirne e João Paulo II, atrelado ao maior escoamento a jusante.

O loteamento João Paulo II apresenta uma elevada taxa de ocupação do solo (0,72); as edificações nele construídas atendem aos padrões atuais do mercado imobiliário para habitações direcionadas às classes de rendas baixa e média baixa. Para maximizar o lucro, os empreendedores optam por um modo de ocupação que maximize a quantidade de unidades habitacionais, que tendem a ser pequenas (raramente ultrapassam os 70 m<sup>2</sup> de área construída) e possuem pouca diversidade arquitetônica. O cenário resultante é composto por ruas marcadas pela repetição de uma única tipologia habitacional. Essa forma de ocupação justifica o elevado valor médio de suscetibilidade (Tabela 4). Como principais desdobramentos desse novo modo de ocupação, destaca-se um brando rigor aos recuos mínimos estabelecidos no Código de Obras Municipal (Lei 5.410/13), que recomenda recuos laterais nem sempre executados, e os recuos frontais mínimos (4 metros) quase sempre dão lugar a garagens e a muros altos. Esse padrão é recorrente a todo o perímetro urbano: interfaces cada vez mais inativas em relação aos espaços livres públicos.

Desta forma, evidencia-se como os diferentes projetos de urbanização influenciam de forma diversa a suscetibilidade às inundações e aos alagamentos, sobretudo em uma bacia que apresenta heterogeneidade na ocupação dos loteamentos (espontânea e

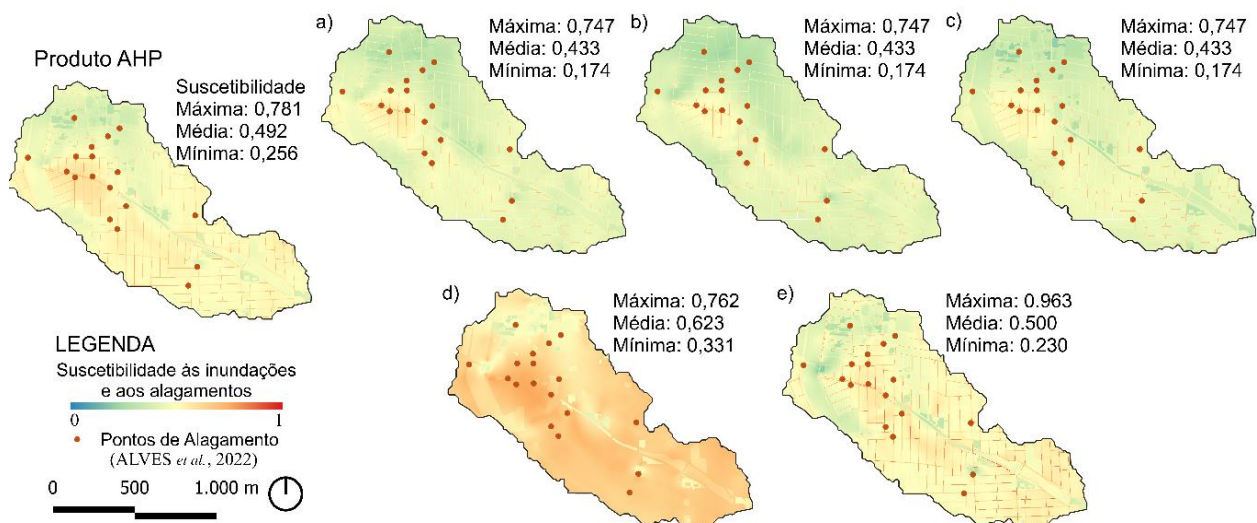
planejada), com a tendência a uma cidade “colcha de retalhos” composta por microcosmos urbanos diversos. Portanto, não apenas esses projetos devem entrar em análise como a própria morfologia consequente. Como exemplo comparativo, os loteamentos Severino Cabral e João Paulo II apresentaram ocupação gradativa após a execução das habitações, mas possuem distintas suscetibilidades e incidência de pontos de inundação e alagamento, devido às diferenças em suas métricas morfológicas.

Além desta análise, é possível evidenciar que o canal de macrodrenagem não é suficiente, *per se*, para sanar tais problemas ao longo da bacia, pois as áreas mais suscetíveis distam desse elemento de macrodrenagem. Desta forma, se comprova que o projeto de drenagem não foi produzido segundo os padrões morfológicos, favorecendo assim as vulnerabilidades na localidade.

Apesar dos resultados destacados, por ser um método que realiza a inferência a partir da análise pixel a pixel, existem algumas limitações que podem interferir nos resultados, como o cálculo não considerar a área a montante do pixel, onde o escoamento é efetivamente gerado.

Conclui-se, da análise de sensibilidade para cada critério (Figura 9), que o sistema possui maior sensibilidade a alterações dos critérios de conectividade, em função da configuração do sistema de drenagem superficial, e de densidade, que restringe a ocupação dos lotes, com alterações significativas nos resultados de suscetibilidade final.

**Figura 9:** Análise de sensibilidade dos critérios.



Remoção do critério: a) Proximidade do canal b) Cobertura do solo c) Declividade d) Conectividade e) Densidade.

## 6 Conclusão

A consistência conceitual e empírica do mapa de suscetibilidade às inundações e aos alagamentos demonstrou que a metodologia utilizada foi capaz de incorporar fatores relevantes à avaliação da drenagem nessas formas urbanas, complementando os demais estudos qualitativos e teóricos sobre a temática. Contribuição importante foi inserir métricas da morfologia urbana nas investigações hidrológicas, demonstrando como o processo de produção do espaço tem influência nos desastres que assolam os assentamentos urbanos. Acrescenta, portanto, uma nova discussão aos trabalhos que

investigam a suscetibilidade às inundações, mas desconsideram a ocupação urbana e a forma do espaço construído.

Na bacia estudada, as métricas mais relevantes, nesta ordem, foram: a densidade urbana, a conectividade das vias, a declividade do terreno, a cobertura do solo e a proximidade do canal. A análise multicriterial também revelou os impactos dos diversos padrões morfológicos presentes na bacia. O caso estudado demonstra como a consideração das métricas morfológicas pode auxiliar a formulação de estratégias de planejamento e gestão urbana para adaptação aos extremos esperados em um clima futuro, inclusive sendo robustas às incertezas das projeções de mudanças climáticas. A aplicação da mesma metodologia em bacias com outros padrões morfológicos poderá gerar uma base de dados que permita generalização.

## Agradecimentos

Os resultados apresentados neste artigo são produtos dos Institutos Nacionais de Ciência e Tecnologia (INCTs), Observatório das Metrôpoles, Mudanças Climáticas Fase 2, e Observatório Nacional de Segurança Hídrica e Gestão Adaptativa. Os autores agradecem o suporte financeiro e de bolsas concedidos pela CAPES e pelo CNPq.

## Referências

- AERTS, J.; BOTZEN, W. J.; CLARKE, K. C.; CUTTER, S. L.; HALL, J. W.; MERZ, B.; MICHELKERJAN, E.; MYSIAK, J.; SURMINSKI, S.; KUNREUTHER, H. Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 3, p. 193-199, 2018.
- AHMED, A.; HEWA, G.; ALRAJHI, A. Flood susceptibility mapping using a geomorphometric approach in South Australian basins. **Natural Hazards**, v. 106, n. 1, p. 629-653, 2021.
- AHMED, S.; MEENAR, M.; ALAM, A. Designing a Blue-Green Infrastructure (BGI) network: toward water-sensitive urban growth planning in Dhaka, Bangladesh. **Land**, v. 8, n. 9, p. 138, 2019.
- ALVES, P. B. R.; TSUYUGUCHI, B. B.; RUFINO, I. A. A.; FEITOSA, P. H. C. Mapping of flood susceptibility in Campina Grande county-PB: a spatial multicriteria approach. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, p. 28-43, 2018.
- ALVES, L. G. F.; GALVÃO, C. O.; SANTOS, B. L. F.; OLIVEIRA, E. F.; MORAES, D. A. Modelling and assessment of sustainable urban drainage systems in dense precarious settlements subject to flash floods. **La Houille Blanche: Hydroscience Journal**, v. 108, p. 2016024, 2022.
- AZAREH, A.; RAFIEI SARDOOI, E.; CHOUBIN, B.; BARKHORI, S.; SHAHDADI, A.; ADAMOWSKI, J.; SHAMSHIRBAND, S. Incorporating multi-criteria decision-making and fuzzy-value functions for flood susceptibility assessment. **Geocarto International**, v. 36, n. 20, p. 2345-2365, 2021.
- BARAU, A. S.; MACONACHIE, R.; LUDIN, A. N. M.; ABDULHAMID, A. Urban morphology dynamics and environmental change in Kano, Nigeria. **Land Use Policy**, v. 42, p. 307-317, 2015.

- BERGHAUSER PONT, M.; HAUPT, P A. The Spacemate: density and the typomorphology of the urban fabric. **Nordisk Arkitekturforskning**, v. 4, p. 55-68, 2005.
- BLÖSCHL, G.; NESTER, T.; KOMMA, J.; PARAJKA, J.; PERDIGÃO, R. A. P. The June 2013 flood in the Upper Danube Basin, and comparisons with the 2002, 1954 and 1899 floods. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 12, p. 5197-5212, 2013.
- BOGO, R. S. Plano Diretor Participativo, território e inundações em Rio do Sul/SC. **Cadernos Metrôpole**, v. 22, n. 48, p. 555-578, 2020.
- CALDEIRA, T. **Cidade de muros: crime, segregação e cidadania em São Paulo**. São Paulo: Editora 34; Edusp, 2000.
- CAMPOS, A. C. M. A. **Alphaville-Tamboré e Barra da Tijuca: as ações programadas e a estruturação do sistema de espaços livres**. 2008. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CAVALCANTI, I. E.; MENDES, L. T.; BARROS FILHO, M. N. M. Artefato metodológico do *City Pattern*: tradução computacional paramétrica de princípios de Christopher Alexander sobre forma e vida urbana. **Gestão & Tecnologia de Projetos**, v. 17, n. 1, p. 111-129, 2022.
- COELHO, L. L. Os conceitos de dispersão e fragmentação urbana sob a abordagem da paisagem. *In: ENCONTRO NACIONAL DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO*, 4., 2016, Porto Alegre. **Anais eletrônicos** [...]. Porto Alegre: ANPARQ, 2016. Disponível em: <https://www.anparq.org.br/dvd-enanparq-4/SESSAO%2030/S30-01-COELHO,%20L.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2024.
- CUNHA, N. S.; MAGALHÃES, M. R.; DOMINGOS, T.; ABREU, M. M.; KÜPFER, C. The land morphology approach to flood risk mapping: an application to Portugal. **Journal of Environmental Management**, v. 193, p. 172-187, 2017.
- DADASHPOOR, H.; AZIZI, P.; MOGHADASI, M. Analyzing spatial patterns, driving forces and predicting future growth scenarios for supporting sustainable urban growth: Evidence from Tabriz metropolitan area, Iran. **Sustainable Cities and Society**, v. 47, p. 101502, 2019.
- DALFI, R. L.; SANTOS, A. R.; CAMPOS, R. F.; MOREIRA, T. R.; EUGENIO, F. C.; SANTOS, G. M. A. D. A. Cenários distintos para o mapeamento de áreas de inundação nos bairros do município de Alegre, ES. **Cadernos de Geociências**, v. 10, n. 2, p. 76-86, 2013.
- DANKERS, R.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; FALLOON, P. D.; FEKETE, B. M.; GOSLING, S. N.; HEINKE, J.; KIM, H.; MASAKI, Y.; SATOH, Y.; STACKE, T.; WADA, Y.; WISSER, D. First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3257-3261, 2014.
- DENG, X.; XU, Y. Degrading flood regulation function of river systems in the urbanization process. **Science of the Total Environment**, v. 622, p. 1379-1390, 2018.
- ESPOSITO, A.; DI PINTO, V. Urban resilience and risk assessment: how urban layout affects flood risk in the city. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL*

- SCIENCE AND ITS APPLICATIONS, 14., 2014, Guimarães. **Proceedings** [...]. Guimarães: IEEE, 2014. p. 204-207.
- GALLARDO, A. Geostatística. **Ecosistemas**, Mósteles, v. 15, n. 3, p. 1-11, 2006
- GIL, J.; STEINBACH, P. From flood risk to indirect flood impact: evaluation of street network performance for effective management, response and repair. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 118, p. 335-344, 2008.
- GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, p. 61-69, 2017.
- HATIPOGLU, H. K.; MAHMUT, S. B. Borders (in between): a city within a city decoding different morphologies of fragmented housing. **Civil Engineering and Architecture**, v. 8, n. 5, p. 880-889, 2020.
- HAMMOND, M. J.; CHEN, A. S.; DJORDJEVIĆ, S.; BUTLER, D.; MARK, O. Urban flood impact assessment: a state-of-the-art review. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 1, p. 14-29, 2015.
- HILLIER, B.; HANSON, J. **The social logic of space**. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.
- JALAYER, F.; DE RISI, R.; DE PAOLA, F.; GIUGNI, M.; MANFREDI, G.; GASPARINI, P.; TOPA, M. E.; YONAS, N.; YESHITELA, K.; NEBEBE, A.; CAVAN, G.; LINDLEY, S.; PRINTZ, A.; RENNERT, F. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. **Natural Hazards**, v. 73, n. 2, p. 975-1001, 2014.
- KHAH, M. N.; MIRALAMI, S. F.; POURSAFAR, Z. Route analysis in the architecture of museums and tomb buildings through space syntax case study: (Tomb of Nader Shah in Mashhad, Avicenna Mausoleum in Hamadan, and Mausoleum of poets in Tabriz). **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 20, n. 6, p. 640-649, 2021.
- LANGENBUCH, J. R. **A estruturação da Grande São Paulo: um estudo de Geografia Urbana**. Rio de Janeiro: IBGE, 1971.
- LUIZ, G. C.; ROMÃO, P. A. Interação solo-atmosfera e processos de inundação e alagamentos na cidade de Goiânia-GO. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 05, p. 1891-1903, 2019.
- MACHADO, E. C. M.; FARIAS SANTOS, B. L.; SANTOS, C.; ALVES, L. G. F.; VEIGA, M. E.; MORAES, D. A.; GALVAO, C. O. Urbanização de assentamentos precários e o desafio da abordagem integrada a partir da drenagem urbana: o caso da bacia da Ramadinha. In: FERRARA, L. N.; CARDOSO, A. L.; MACHADO, E. (org.). **A dimensão ambiental na urbanização de favelas: olhares críticos a partir da drenagem urbana nos projetos do PAC**. São Paulo: Letra Capital Editora, 2021. p. 117- 156.
- MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos**. Santa Maria: INPE, 2007.
- MENDES, Y. S.; RIBEIRO, V. O.; PARANHOS FILHO, A. C.; GALBETTI, T. A. S. Álgebra de mapas na elaboração de carta de risco à inundação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 2, p. 349-362. 2020.

- MONTEIRO, E. Z.; PINA, S. A. M. G.; FREIRE, R. A.; TURCZYN, D. T. O estudo da morfologia urbana na Região Metropolitana de Campinas. **URBE – Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, e20190260, 2020.
- MORADI, S.; YOUSEFI, H.; NOOROLLAHI, Y.; ROSSO, D. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: case study of Alborz Province, Iran. **Energy Strategy Reviews**, v. 29, p. 100478, 2020.
- MORAES, D.; MIRANDA, L.; CARVALHO, M.; ALMEIDA, A.; LACERDA, J. **Direito à cidade e habitação**: condicionantes institucionais e normativas para a implementação de políticas de urbanização de favelas – avaliação do ciclo recente. Relatório Final. Campina Grande: UFCG, 2021.
- MORELLI, A. B.; CUNHA, A. L. Measuring urban road network resilience to extreme events: an application for urban floods. **Physics and Society**, v. 1, 2019.
- MOTTA JR, J. C.; TUCCI, C. E. M. Simulation of the urbanization effect in flow. **Hydrological Sciences Journal**, v. 29, n. 2, p. 131-147, 1984.
- MOURA, M. M.; ARAUJO, M. M. F.; CASTRO, T. A. D.; LEANDRO, D. Suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do rio Piratini-RS. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 6, n. 2, p. 17-25, 2019.
- NACHAPPA, T. G.; PIRALILOU, S. T.; GHOLAMNIA, K.; GHORBANZADEH, O.; RAHMATI, O.; BLASCHKE, T. Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125275, 2020.
- NEVES, L. V.; DEUS, L. A. B.; OSCAR JÚNIOR, A. C. S.; FERNANDES, M. C. Mudanças de uso e cobertura da terra e áreas suscetíveis   inunda o–estudo de caso do município de Duque de Caxias/RJ. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 30-43, 2019.
- OLIVEIRA, F. A.; VIEIRA, C. V. Semi-detailed geomorphological map of Northeastern Santa Catarina State, Brazil—the Garuva Sheet. **Journal of Maps**, v. 5, n. 1, p. 66-74, 2009.
- OLIVEIRA, K. S.; SILVA, M. L. B. S.; NASCIMENTO, P. S. R. Mapeamento temático de áreas vulneráveis a riscos de inunda es na cidade de Aracaju-SE. *In*: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE, 12., 2019, Aracaju. **Anais eletrônicos** [...]. Aracaju: ABRH, 2019. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/100/ENREHSE0044-1-20190315-134930.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2024.
- PINTO, V. G.; LIMA, R. N. S.; SANTOS, R. C. P.; RIBEIRO, C. B. M. Influência do número de classes de vulnerabilidade na determina o da suscetibilidade morfométrica   inunda o. **Revista Ambiente &  gua**, v. 11, p. 637-649, 2016.
- PREVOT-SCHAPIRA, M. F. Fragmentaci n espacial y social: conceptos y realidades. **Perfiles Latinoamericanos**, n. 19, 33-56. 2001.
- PUSPORINI, N.; PALUPI, W. R.; SEPTANTI, D.; CAHYADINI, S.; SANTOSA, H. R. Morphological concept in evaluating riverbank slum settlement programs in Kotalama Malang. **Civil Engineering and Architecture**, v. 9, n. 3, p. 634-645, 2021.

- REGO, R. L.; MENEGUETTI, K. S. About urban morphology: basic topics for urban form studies. **Acta Scientiarum-Technology**, v. 33, n. 2, p. 123-127, 2011.
- RISMANCHIAN, O.; BELL, S. A study over spatial segregation of deprived areas in spatial structure of Tehran by using space syntax technique. **The Monthly Scientific Journal of Bagh-E Nazar**, v. 8, n. 17, p. 69-80, 2011.
- SAATY, R. W. The analytic hierarchy process: what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83-98, 2008.
- SALTELLI, A.; CHAN, K.; SCOTT, M (ed.). **Sensitivity analysis**. New York: John Wiley & Sons, 2000.
- SANTOS, A. R.; LOUZADA, F. L. R. O.; EUGENIO, F. C. **ArcGIS 9.3 total: aplicações para dados espaciais**. Alegre: CAUFES, 2010.
- SANTOS, B. L. F. **Avaliação integrada de intervenções em drenagem urbana em assentamentos precários: o caso da Bacia da Ramadinha em Campina Grande/PB**. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.
- SARAUSKIENE, D.; KRIAUCIUNIENE, J.; REIHAN, A.; KLAVINS, M. Flood pattern changes in the rivers of the Baltic countries. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 23, n. 1, p. 28-38, 2015.
- SEABRA, V. S.; ROCHA-LEÃO, O. M. Razões para as enchentes e inundações no Residencial Carlos Marighella: uma análise multitemática da Bacia do Rio do Vigário, em Maricá-RJ. **Revista da ANPEGE**, v. 15, p. 114-137, 2019.
- TUCCI, C. E. M. Gestão integrada das águas urbanas. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 5, n. 2, p. 71-81, 2008.