



## MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NA ÁREA URBANA DE MANAUS (AM)

## MAPPING OF AREAS SUSCEPTIBLE TO FLOODING IN THE URBAN AREA OF MANAUS (AM)

## MAPEO DE ÁREAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIONES EN EL ÁREA URBANA DE MANAUS (AM)



10.56238/sevenVIIImulti2026-087

**Victoria Beatriz Vasconcelos de Lima Souza**

Instituição: Universidade do Estado do Amazonas  
E-mail: victoriasouza132017@gmail.com

**Camila de Oliveira Praia**

Instituição: Universidade Federal do Amazonas (UFAM)  
E-mail: camilapraia23@gmail.com

**Ellen Raphael**

Profa. Dra.

Instituição: Universidade do Estado do Amazonas

**Cláudia Cândida Silva**

Profa. Dra.

Instituição: Universidade do Estado do Amazonas

### RESUMO

As inundações urbanas constituem um dos principais problemas socioambientais enfrentados por cidades localizadas em regiões tropicais úmidas, sendo intensificadas por processos de urbanização acelerada e planejamento territorial inadequado. Em Manaus, Amazonas, fatores naturais, como elevada pluviosidade, relevo pouco declivo e densa rede hidrográfica, associados à ocupação desordenada de áreas de fundos de vale e planícies fluviais, contribuem para a recorrência desses eventos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo mapear as áreas suscetíveis à inundação na área urbana de Manaus, por meio da aplicação do modelo HAND (Height Above Nearest Drainage), utilizando técnicas de geoprocessamento e dados de elevação. Para tanto, foi empregado um Modelo Digital de Elevação com resolução espacial de 30 m, submetido a correções hidrológicas e ao processamento necessário para a geração do raster HAND, que expressa a altura relativa do terreno em relação à drenagem mais próxima. Os resultados foram classificados em cinco classes de suscetibilidade à inundação, variando de Muito Alta a Muito Baixa. Os mapas gerados evidenciam que as áreas com maior suscetibilidade concentram-se principalmente ao longo dos rios e igarapés urbanos, em baixas cotas altimétricas, enquanto as áreas de menor suscetibilidade predominam nos setores de terras firmes. Conclui-se que o modelo HAND mostrou-se uma ferramenta eficiente para a identificação espacial de áreas potencialmente inundáveis, fornecendo subsídios relevantes ao planejamento urbano e à gestão de riscos hidrológicos na cidade de Manaus.

**Palavras-chave:** Inundação Urbana. Geoprocessamento. Modelo HAND. Risco Hidrológico. Manaus.

## ABSTRACT

Urban flooding is one of the main socio-environmental problems faced by cities located in humid tropical regions, intensified by accelerated urbanization processes and inadequate territorial planning. In Manaus, Amazonas, natural factors such as high rainfall, gently sloping terrain, and a dense hydrographic network, associated with the disordered occupation of valley bottoms and floodplains, contribute to the recurrence of these events. In this context, the present study aimed to map the areas susceptible to flooding in the urban area of Manaus, through the application of the HAND (Height Above Nearest Drainage) model, using geoprocessing techniques and elevation data. To this end, a Digital Elevation Model with a spatial resolution of 30 m was employed, subjected to hydrological corrections and the necessary processing to generate the HAND raster, which expresses the relative height of the terrain in relation to the nearest drainage. The results were classified into five flood susceptibility classes, ranging from Very High to Very Low. The generated maps showed that the areas with the highest susceptibility are mainly concentrated along urban rivers and streams, at low elevations, while the areas with the lowest susceptibility predominate in the upland sectors. It is concluded that the HAND model proved to be an efficient tool for the spatial identification of potentially floodable areas, providing relevant support for urban planning and hydrological risk management in the city of Manaus.

**Keywords:** Urban Flooding. Geoprocessing. HAND Model. Hydrological Risk. Manaus.

## RESUMEN

Las inundaciones urbanas son uno de los principales problemas socioambientales que enfrentan las ciudades ubicadas en regiones tropicales húmedas, intensificado por los procesos de urbanización acelerados y la planificación territorial inadecuada. En Manaus, Amazonas, factores naturales como las altas precipitaciones, el terreno de suave pendiente y una densa red hidrográfica, asociada a la ocupación desordenada de los fondos de los valles y las llanuras de inundación, contribuyen a la recurrencia de estos eventos. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo mapear las áreas susceptibles a inundaciones en el área urbana de Manaus, mediante la aplicación del modelo HAND (Altura Sobre el Drenaje Más Cercano), utilizando técnicas de geoprocésamiento y datos de elevación. Para este fin, se empleó un Modelo Digital de Elevación con una resolución espacial de 30 m, sometido a correcciones hidrológicas y al procesamiento necesario para generar el ráster HAND, que expresa la altura relativa del terreno en relación con el drenaje más cercano. Los resultados se clasificaron en cinco clases de susceptibilidad a inundaciones, que van de Muy Alta a Muy Baja. Los mapas generados mostraron que las áreas con mayor susceptibilidad se concentran principalmente a lo largo de ríos y arroyos urbanos, en elevaciones bajas, mientras que las áreas con menor susceptibilidad predominan en las zonas altas. Se concluye que el modelo HAND demostró ser una herramienta eficaz para la identificación espacial de zonas potencialmente inundables, brindando un apoyo relevante para la planificación urbana y la gestión del riesgo hidrológico en la ciudad de Manaos.

**Palabras clave:** Inundaciones Urbanas. Geoprocésamiento. Modelo HAND. Riesgo Hidrológico. Manaos.

## 1 INTRODUÇÃO

As inundações urbanas configuram-se como um dos principais problemas socioambientais associados ao processo de urbanização acelerada, sobretudo em cidades localizadas em regiões tropicais úmidas. A expansão desordenada do tecido urbano, a intensificação da impermeabilização do solo, a ocupação de áreas naturalmente suscetíveis e a insuficiência ou inadequação dos sistemas de drenagem têm contribuído para o aumento da frequência e da magnitude desses eventos (Tucci, 2007; Almeida et al., 2020). Nesse contexto, mapear áreas suscetíveis à inundação destaca-se como uma ferramenta fundamental para o planejamento urbano, a gestão territorial e a redução de riscos hidrológicos.

A cidade de Manaus, localizada no estado do Amazonas-Brasil, apresenta condições naturais e antrópicas que favorecem a ocorrência de inundações, pois o município está situado às margens do rio Negro e é drenado por uma densa rede de igarapés urbanos, os quais desempenham papel central na dinâmica hidrológica local. Entretanto, o crescimento urbano acelerado promoveu alterações significativas nesses sistemas naturais, como canalizações, retificações de cursos d'água e supressão da vegetação ciliar, comprometendo a capacidade de armazenamento e escoamento das águas pluviais (Marinho & Silva, 2023).

A dinâmica hidrológica regional é fortemente influenciada pelo clima equatorial úmido (AF), de acordo com a classificação de Köppen (1948), e caracterizar-se por elevados índices pluviométricos anuais e por cheias sazonais expressivas do rio Negro. Um dos eventos extremos recentes, como a cheia histórica de 2021, em que o nível do Rio Negro atingiu valores  $\geq 29$  metros na régua fluviométrica do Porto de Manaus, evidenciam a magnitude dos impactos hidrológicos sobre a área urbana de Manaus, afetando infraestrutura, mobilidade urbana e a qualidade de vida da população (Maciel et al., 2022; Cury et al., 2022). Situações como essas reforçam a necessidade de compreender a relação entre relevo, rede de drenagem e ocupação urbana na configuração das áreas suscetíveis à inundação, com foco na prevenção e controle de cenários.

O processo de expansão urbana de Manaus, intensificado a partir da implantação da Zona Franca, ocorreu de forma rápida e, em grande parte, dissociada de um planejamento territorial adequado. Estudos de caracterização urbana apontam para a ocupação progressiva de áreas ambientalmente frágeis, como fundos de vale e planícies de inundações, frequentemente associada a populações socialmente vulneráveis (Rodrigues & Schor, 2019; Costa et al., 2023). Essa configuração socioespacial amplia a exposição aos eventos de inundações e transforma um fenômeno natural em um problema recorrente de ordem socioambiental.

Além das cheias fluviais relacionadas ao rio Negro, Manaus enfrenta episódios frequentes de inundações pluviais associados à ocorrência de chuvas intensas e à limitada capacidade do sistema de drenagem urbana. O elevado grau de impermeabilização do solo, aliado à baixa declividade de extensas

áreas do sítio urbano, favorece a rápida geração de escoamento superficial, resultando em alagamentos mesmo fora do período de cheia dos grandes rios (Tucci, 2007; Santos et al., 2018). Assim, as inundações urbanas em Manaus apresentam caráter multifatorial, fortemente condicionado pela topografia, pela proximidade aos canais de drenagem e pelo uso e ocupação do solo.

Do ponto de vista físico-ambiental, estudos voltados à caracterização de bacias hidrográficas urbanas em Manaus indicam que áreas situadas em baixas cotas altimétricas e próximas à rede de drenagem apresentam maior propensão à inundaçāo (Silva et al., 2015; Marinho & Silva, 2023). Documentos técnicos institucionais, como a Carta de Suscetibilidade a Inundações do Serviço Geológico do Brasil (SGB) que indicam às áreas de risco conforme suas categorias, reforçam a importância da análise integrada do relevo e da hidrografia para a identificação de áreas críticas no perímetro urbano (Souza et al., 2024).

Apesar da existência de estudos pontuais e de produtos técnicos oficiais, ainda são limitadas as pesquisas que utilizam modelos baseados na relação entre elevação do terreno e proximidade aos cursos d'água para o mapeamento sistemático da suscetibilidade à inundaçāo em toda a área urbana de Manaus. Nesse contexto, modelos derivados de dados altimétricos, como o HAND (Height Above Nearest Drainage), apresentam grande potencial por permitirem a identificação de áreas topograficamente mais propensas à acumulação de água, a partir da diferença vertical entre a superfície do terreno e a drenagem mais próxima, utilizando dados de Modelos Digitais de Elevação (Nobre et al., 2011).

O uso de técnicas de geoprocessamento associadas ao modelo HAND possibilita a integração eficiente entre relevo e rede de drenagem, fornecendo subsídios técnicos consistentes para a análise espacial da suscetibilidade à inundaçāo em ambientes urbanos. Em uma cidade marcada por intensas desigualdades socioespaciais, como Manaus, esse tipo de abordagem contribui para o planejamento urbano preventivo, a priorização de áreas para intervenções estruturais e a gestão de riscos hidrológicos, especialmente em contextos de eventos extremos cada vez mais frequentes.

Dessa forma, a utilização de modelos baseados na relação entre elevação do terreno e rede de drenagem contribui para uma compreensão mais precisa da distribuição espacial da suscetibilidade à inundaçāo, fortalecendo a base técnico-científica necessária à tomada de decisão no âmbito da gestão urbana e ambiental.

## 2 OBJETIVO GERAL

Mapear as áreas suscetíveis à inundaçāo na área urbana de Manaus (AM) por meio da aplicação do modelo HAND (Height Above Nearest Drainage), utilizando técnicas de geoprocessamento e dados de elevação, com vistas a subsidiar o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos.

## 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Processar o Modelo Digital de Elevação (MDE) da área urbana de Manaus (AM), realizando as correções hidrológicas necessárias para a aplicação do modelo HAND;
- II. Aplicar o modelo HAND (Height Above Nearest Drainage) para estimar a altura relativa do terreno em relação à drenagem mais próxima e classificar as áreas urbanas em classes de suscetibilidade à inundaçāo;
- III. Analisar a distribuição espacial das áreas suscetíveis à inundaçāo, avaliando sua relação com a rede de drenagem urbana, o relevo e suas implicações para o planejamento urbano e a gestão de riscos hidrológicos

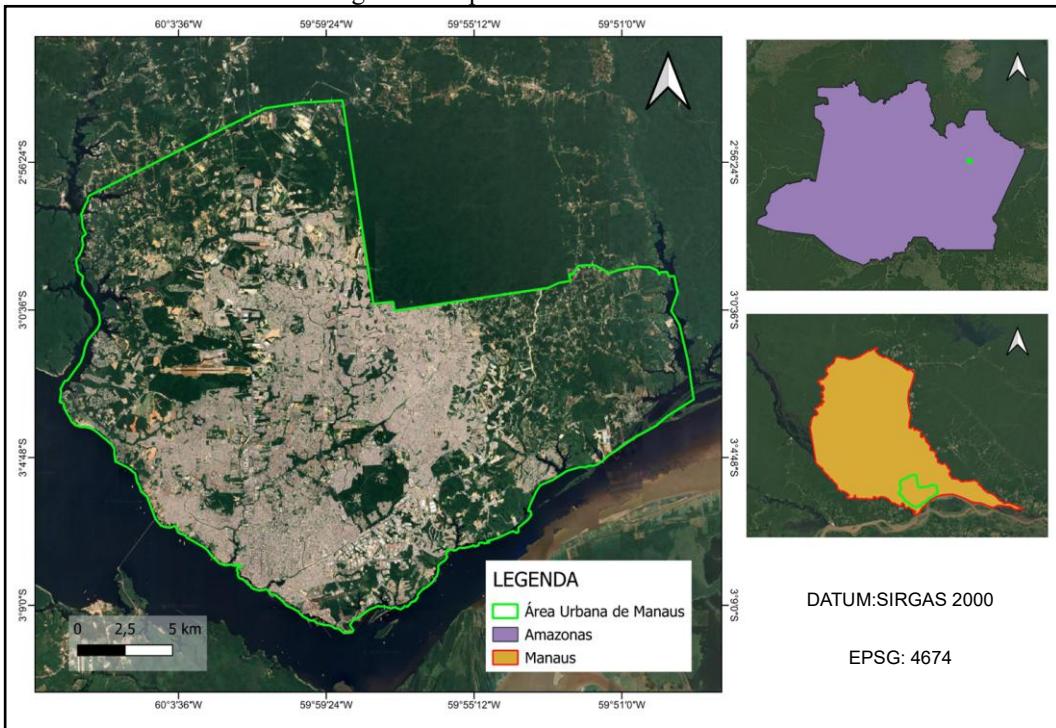
## 3 METODOLOGIA

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área urbana do município de Manaus (AM) (Figura 1), está situada na região central da Amazônia brasileira, inserida no domínio morfoclimático equatorial. Conforme a classificação climática de Köppen, apresenta clima do tipo Af, caracterizado por elevadas temperaturas, com médias mensais superiores a 26° C, baixa amplitude térmica anual e elevados índices pluviométricos, sem a ocorrência de estação seca definida (Köppen, 1948; Alvares et al., 2013), além uma rede hidrográfica densa e espacialmente distribuída por diversos bairros da capital. A ocupação urbana, em muitos casos, extrapola as áreas originalmente destinadas à construção de moradias, intensificando a exposição da população a eventos hidrológicos extremos e potencializando impactos socioambientais associados às inundações (Do Carmo Filho; Da Cunha Albuquerque; Oliveira, 2021).

Do ponto de vista geomorfológico, Manaus apresenta relevo predominantemente suave, com baixas declividades e cotas altimétricas relativamente reduzidas nas áreas adjacentes à rede de drenagem. O sítio urbano é composto por extensas áreas de terras firmes intercaladas por fundos de vale associados aos igarapés urbanos e às planícies fluviais do rio Negro. Essas feições condicionam a dinâmica hidrológica local, favorecendo a acumulação de água em áreas topograficamente mais baixas, sobretudo durante eventos de cheia fluvial e precipitações intensas.

Figura 1: Mapa da Cidade de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A hidrografia do município é marcada pela presença do rio Negro, um dos principais cursos d'água da Amazônia, além de uma densa rede de igarapés urbanos, tendo como exemplo: o do Mindú, dos Franceses e do São Raimundo. Muitos desses cursos d'água sofreram alterações significativas em sua morfologia natural em decorrência do processo de urbanização, incluindo canalizações, retificações e supressão da vegetação ciliar, o que compromete sua capacidade de drenagem e aumenta a suscetibilidade à ocorrência de inundações nas áreas adjacentes, fator que pode ser comprovado com a ocorrência das precipitações constantes, principalmente no período de inverno Amazônico.

Essas características físicas, clima equatorial úmido, relevo pouco declinoso e densa rede hidrográfica, exercem influência direta sobre a dinâmica das inundações urbanas em Manaus, justificando a aplicação de modelos baseados na relação entre elevação do terreno e proximidade à drenagem, como o HAND, para a identificação de áreas potencialmente suscetíveis à inundaçāo no espaço urbano.

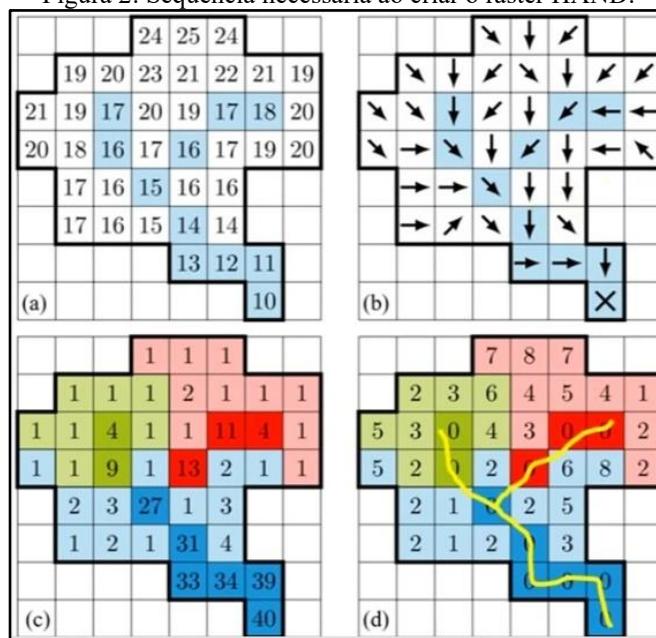
### 3.2 APLICAÇÃO DO MODELO HAND

Para o mapeamento das áreas suscetíveis à inundação, foi adotado o modelo HAND (Height Above Nearest Drainage), que estima a altura relativa de cada ponto do terreno em relação à drenagem mais próxima. O HAND Model foi desenvolvido por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em parceria com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), com o objetivo de aprimorar a precisão dos mapas de inundaçāo por meio de técnicas avançadas de análise espacial e modelagem hidrológica. O modelo permite identificar áreas

potenciais de acumulação de água durante eventos de chuvas intensas, sendo amplamente utilizado no planejamento urbano e na gestão de riscos hidrológicos.

O processamento do HAND Model baseia-se em etapas sequenciais. Inicialmente, foi realizada a correção do Modelo Digital de Elevação (MDE), de modo a representar de forma mais fidedigna o relevo natural. Em seguida, procedeu-se ao cálculo da direção de fluxo, identificando os caminhos preferenciais do escoamento superficial. Posteriormente, foi estimado o fluxo de acumulação, que indica a capacidade de cada célula do terreno em concentrar água. Por fim, foi gerado o raster HAND, que expressa a diferença altimétrica entre cada ponto e o curso d'água mais próximo, permitindo a delimitação espacial das áreas suscetíveis à inundaçāo.

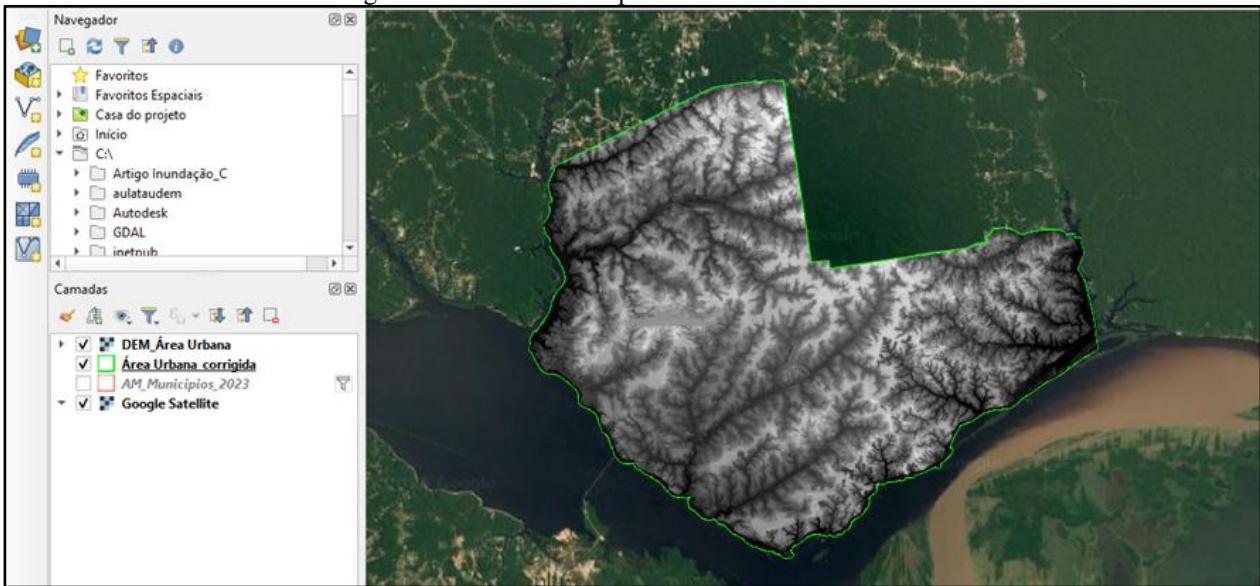
Figura 2: Sequência necessária ao criar o raster HAND.



(a) MDE corrigido (b) Direção de fluxo (c) Fluxo de acumulação, e (d) Raster com altura acima da drenagem mais próxima HAND. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=MBOQEbhWhcQo>

O Modelo Digital de Elevação utilizado foi obtido por meio do plugin OpenTopography, priorizando dados com melhor resolução espacial disponível para a área de estudo. Optou-se pelo MDE Copernicus com resolução espacial de 30 m, considerando sua consistência e adequação para análises hidrológicas em escala urbana, o MDE foi recortado para área de interesse (Figura 3). Todo o processamento espacial foi realizado no software QGIS Desktop versão 3.40.7, ambiente livre amplamente empregado em estudos de geoprocessamento.

Figura 3: MDE recortado para área urbana de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após a geração do raster HAND, os dados foram importados para o QGIS, onde se procedeu à análise e à classificação da suscetibilidade à inundação. Utilizou-se a ferramenta “Reclassificar por tabela” para definir classes temáticas de risco hidrológico, adotando os seguintes intervalos: Muito Alta (0 a 1 m), Alta (1 a 5 m), Média (5 a 10 m), Baixa (10 a 25 m) e Muito Baixa (25 a 100 m). Essa classificação permitiu a representação cartográfica das áreas potencialmente mais vulneráveis a eventos de inundação na área urbana de Manaus.

O HAND Model empregado neste estudo fundamenta-se nos trabalhos de Nobre et al. (2011), que difundiram o modelo na comunidade científica internacional. A partir desse marco, diferentes implementações do algoritmo foram desenvolvidas, inclusive em ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Desde 2012, os autores vêm aprimorando uma versão standalone do HAND, desenvolvida em linguagem C++, capaz de gerar a topologia HAND diretamente a partir de dados topográficos digitais, sem a necessidade de informações prévias da rede de drenagem. Essa abordagem amplia a robustez do modelo, permitindo a classificação de terrenos hidrologicamente homogêneos e a geração de zonas escalonadas de risco de inundação, especialmente úteis em estudos preditivos de desastres naturais.

#### 4 DESENVOLVIMENTO

A área urbana de Manaus apresenta um relevo heterogêneo, resultado da interação entre fatores geomorfológicos, hidrológicos e estruturais, que condicionam diretamente a dinâmica das inundações no espaço urbano. O município é cortado por uma rede hidrográfica densa, composta por rios e igarapés, como Tarumã, Puraquequara, São Raimundo e Educandos, os quais estruturaram diversas bacias hidrográficas urbanas. Essa configuração favorece a ocorrência de áreas rebaixadas

naturalmente propensas ao acúmulo de água, sobretudo em setores onde a urbanização alterou significativamente as características originais do solo e da vegetação (Carvalho; Tomasella, 2013).

Do ponto de vista geomorfológico, o relevo urbano de Manaus é caracterizado pela presença de planícies fluviais associadas aos principais cursos d'água, além de baixos planaltos e áreas de terras firmes, com altitudes médias geralmente inferiores a 100 metros. Essas feições influenciam a distribuição espacial das zonas suscetíveis à inundação, uma vez que as áreas mais próximas aos rios e igarapés tendem a apresentar menor cota altimétrica e maior frequência de eventos de alagamento (Carvalho; Tomasella, 2013).

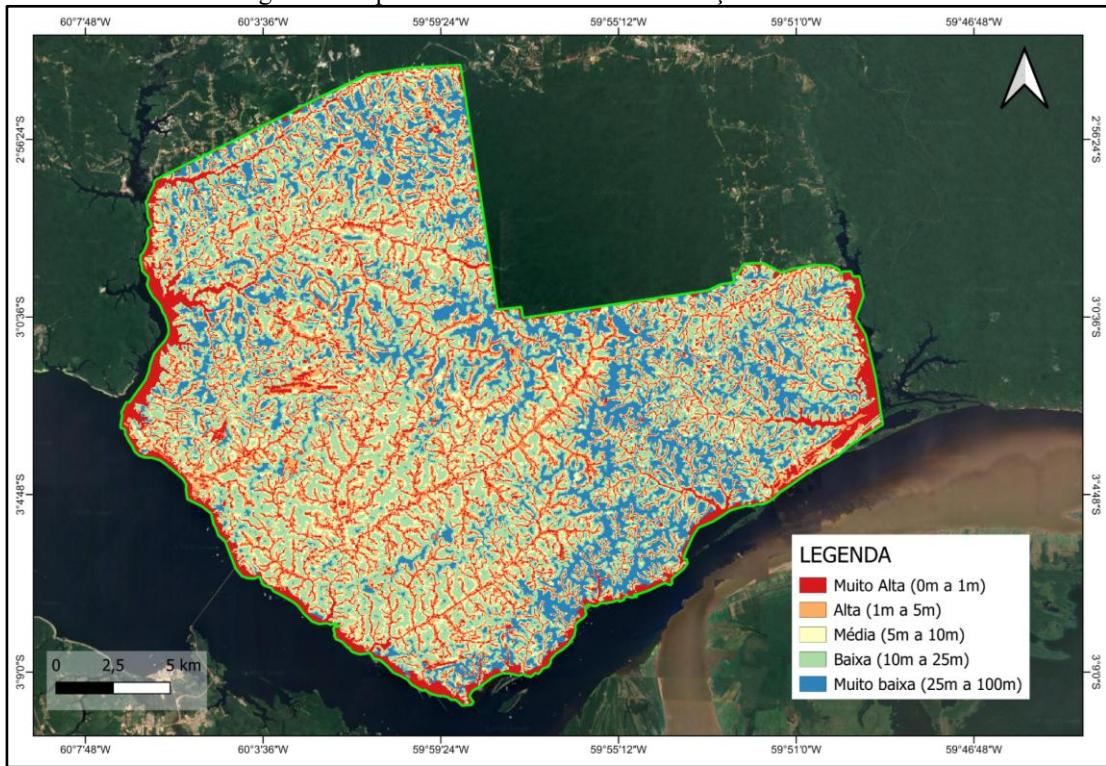
Em termos de vulnerabilidade, as áreas de menor altitude e situadas próximas aos rios e igarapés destacam-se como as mais suscetíveis a inundações, especialmente em contextos de desmatamento e ocupação urbana desordenada. A expansão da malha urbana sobre áreas naturalmente frágeis compromete a capacidade de infiltração do solo e agrava os impactos dos eventos hidrológicos extremos (De Souza Olímpio Et Al., 2024; Macena, 2016).

O processo de urbanização acelerada em Manaus tem promovido a remoção da cobertura vegetal e a impermeabilização do solo, resultando no aumento do escoamento superficial e na sobrecarga dos sistemas naturais de drenagem. Esse cenário intensifica a ocorrência de alagamentos, enxurradas e deslizamentos, sobretudo em encostas e áreas de vale ocupadas de forma inadequada, ampliando os riscos socioambientais (De Souza Olímpio Et Al., 2024; Macena, 2016).

Além disso, a presença de igapós e lagos associados ao Rio Negro, como aqueles localizados na região do Tarumã, configura ambientes de baixa altitude com dinâmica hídrica própria, historicamente adaptados a ciclos naturais de inundação. A expansão urbana sobre essas áreas modifica seu funcionamento hidrológico, aumentando a exposição da população a eventos de inundação e reforçando a necessidade de estudos que subsidiem o planejamento urbano e a gestão do risco (De Souza Olímpio Et Al., 2024; Macena, 2016).

A aplicação do modelo HAND possibilitou a geração do mapa de suscetibilidade à inundação da área urbana de Manaus, evidenciando a relação direta entre a topografia, a proximidade da rede de drenagem e a propensão ao acúmulo de água (Figura 4). O produto cartográfico resultante permite visualizar, de forma integrada, as áreas potencialmente mais vulneráveis a eventos de inundação, constituindo uma ferramenta de apoio à análise espacial do risco hidrológico em ambiente urbano.

Figura 4: Mapa de áreas suscetíveis à inundação de Manaus.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O mapa foi classificado em cinco classes de suscetibilidade à inundação, definidas a partir da altura relativa do terreno em relação à drenagem mais próxima. A classe Muito Alta (0 a 1 m) corresponde às áreas situadas imediatamente adjacentes aos cursos d'água, caracterizadas por elevado potencial de inundação, mesmo sob eventos pluviométricos de menor intensidade. A classe Alta (1 a 5 m) abrange setores ainda fortemente influenciados pela dinâmica fluvial, nos quais o risco permanece significativo durante períodos de chuvas intensas ou cheias sazonais.

A classe Média (5 a 10 m) representa áreas com suscetibilidade intermediária, onde a ocorrência de inundações tende a estar associada a eventos extremos ou à sobrecarga do sistema de drenagem urbana. As classes Baixa (10 a 25 m) e Muito Baixa (25 a 100 m) correspondem a terrenos progressivamente mais elevados, com menor influência direta da rede hidrográfica e, consequentemente, menor probabilidade de inundação.

A análise da distribuição espacial das classes revela a presença de áreas com alto potencial de inundação associadas à densa rede hidrográfica urbana, especialmente ao longo dos principais rios e igarapés, que formam corredores contínuos de elevada suscetibilidade. Contudo, observa-se que as áreas inundáveis não se estendem por grandes distâncias a partir dos cursos d'água, uma vez que o relevo da cidade apresenta, de modo geral, superfícies relativamente planas e cotas altimétricas que se elevam gradualmente a partir dos fundos de vale. Essa configuração geomorfológica limita a expansão lateral das manchas de inundação, concentrando os maiores riscos nas faixas mais próximas à drenagem.

As classes Média e Baixa suscetibilidade distribuem-se de forma mais abrangente no espaço urbano, ocupando áreas intermediárias entre os fundos de vale e as porções mais elevadas do relevo. Já as áreas classificadas como Muito Baixa suscetibilidade predominam nos setores de terras firmes, onde a influência direta da dinâmica fluvial é reduzida e a ocorrência de inundações é menos frequente.

De maneira geral, os resultados do HAND Model indicam que a suscetibilidade à inundaçāo na área urbana de Manaus é fortemente condicionada pela proximidade da rede de drenagem e pelas variações altimétricas, com maior criticidade nas áreas rebaixadas e hidrologicamente conectadas aos cursos d'água. O mapa resultante reforça a aplicabilidade do HAND Model como ferramenta eficiente para a identificação de zonas prioritárias ao planejamento urbano, à gestão de riscos hidrológicos e à implementação de medidas preventivas frente a eventos de inundaçāo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que a suscetibilidade à inundaçāo na área urbana de Manaus (AM) é fortemente condicionada por fatores topográficos e hidrológicos, especialmente pela proximidade da rede de drenagem e pelas variações altimétricas do relevo. A aplicação do modelo HAND permitiu identificar, de forma clara e espacialmente coerente, áreas com maior propensão à ocorrência de inundações, sobretudo aquelas situadas em baixas cotas altimétricas e adjacentes aos principais rios e igarapés urbanos. Esse padrão está em consonância com estudos anteriores realizados na cidade, que destacam a influência direta da morfologia do terreno e da dinâmica fluvial na recorrência de eventos de inundaçāo urbana (Silva et al., 2015; Marinho & Silva, 2023).

As classes de Muito Alta e Alta suscetibilidade concentraram-se predominantemente ao longo dos fundos de vale e das planícies fluviais associadas aos principais cursos d'água, refletindo a forte conectividade hidrológica dessas áreas com a rede de drenagem. Por outro lado, as classes de Baixa e Muito Baixa suscetibilidade ocuparam, majoritariamente, setores de terras firmes e áreas progressivamente mais elevadas, onde a influência direta da dinâmica fluvial é reduzida. Essa distribuição espacial reforça a capacidade do modelo HAND em representar adequadamente a relação entre relevo e inundaçāo, corroborando sua aplicabilidade em estudos de suscetibilidade hidrológica em escala urbana, conforme apontado por Nobre et al. (2011).

Do ponto de vista metodológico, o uso do modelo HAND mostrou-se particularmente vantajoso por demandar essencialmente dados altimétricos e procedimentos de geoprocessamento relativamente simples, o que amplia sua viabilidade de aplicação em contextos urbanos com limitada disponibilidade de dados hidrológicos detalhados. Essa característica é especialmente relevante para cidades amazônicas, onde a complexidade ambiental e as dificuldades de monitoramento contínuo representam desafios adicionais à gestão do risco de inundações (Tucci, 2007; Cuartas et al., 2012). Assim, o HAND

configura-se como uma ferramenta eficiente para análises preliminares e para o suporte à tomada de decisão em políticas públicas voltadas à prevenção de desastres naturais.

Sob a perspectiva do planejamento urbano, os produtos cartográficos gerados neste estudo constituem importantes subsídios técnicos para a identificação de áreas prioritárias para intervenções estruturais e não estruturais, como a restrição à ocupação de fundos de vale, a preservação de áreas ripárias e a adequação dos sistemas de drenagem urbana. Em uma cidade marcada por intensas desigualdades socioespaciais, como Manaus, o mapeamento de suscetibilidade à inundaçāo pode contribuir para a redução da vulnerabilidade de populações expostas e para a promoção de um ordenamento territorial mais compatível com as limitações ambientais do sítio urbano (Rodrigues & Schor, 2019; Costa et al., 2023).

Por fim, destaca-se que, embora o modelo HAND apresente elevada eficiência na identificação de áreas topograficamente suscetíveis à inundaçāo, sua aplicação não substitui análises integradas mais complexas. Estudos futuros podem incorporar variáveis adicionais, como dados pluviométricos, uso e cobertura do solo e informações socioeconômicas, de modo a aprofundar a compreensão dos processos envolvidos e a evolução do risco hidrológico no espaço urbano. Ainda assim, os resultados obtidos demonstram que o modelo HAND representa uma ferramenta robusta e promissora para o apoio ao planejamento urbano e à gestão de riscos hidrológicos na cidade de Manaus, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias preventivas frente à intensificação de eventos extremos associada às mudanças climáticas e à expansão urbana contínua.

## REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- CARVALHO, João Silva; TOMASELLA, Javier. Aspectos morfoestruturais do relevo na região norte da cidade de Manaus e suas influências na dinâmica do aquífero Alter do Chão. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 14, n. 3, p. 295-308, 2013.
- COSTA, S. M. F.; SCHOR, T.; OLIVEIRA, J. A. Crescimento urbano e desigualdades socioespaciais em Manaus (AM). *Acta Geográfica*, v. 17, n. 43, p. 1–20, 2023.
- CUARTAS, L. A.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M. et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 404, p. 13-29, 2012.
- CURY, R. T. S. et al. What happened in 2021? Analysing the biggest Negro River flood in Manaus, Brazil. *Sustainability*, v. 16, n. 7, 2022
- DO CARMO FILHO, Odemar Jose Santos; DA CUNHA ALBUQUERQUE, Adoréa Rebelo; OLIVEIRA, Jean Claudio Campos. Bacias hidrográficas urbanas: o reflexo da precarização do saneamento em Manaus, Amazonas – Brasil. *Ateliê Geográfico*, v. 15, n. 2, p. 70-93, 2021.
- KÖPPEN, W. *Climatología: con un estudio de los climas de la Tierra*. México: Fondo de Cultura Económica, 1948
- MACENA, Lila Sigrid Lemos. Áreas de risco nas bacias hidrográficas urbanizadas de Manaus. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.
- MACIEL, J. S. C.; ALVES, L. G. S.; DE OLIVEIRA, D. G. et al. Analysing the Flood Warning of Negro River in Manaus. *Int. J. Environmental Impacts*, 2022.
- MARINHO, J. S.; SILVA, M. L. Análise morfométrica de áreas afetadas por inundação urbana em Manaus (AM). *Caminhos de Geografia*, v. 24, n. 89, p. 1–15, 2023.
- NOBRE, Antonio Donato; CUARTAS, Luis Augusto; MOMO, Maria Rita et al. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 2015. DOI: 10.1002/hyp.10581.
- NOBRE, Antonio Donato; CUARTAS, Luis Augusto; HODNETT, Mark et al. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 404, p. 13-29, 2011a.
- NOBRE, Antonio Donato; SILVEIRA, A.; CUARTAS, Luis Augusto et al. Aspectos físicos e geográficos das áreas ripárias no Brasil: análise preliminar da legislação. São José dos Campos: Centro de Ciência para o Sistema Terrestre – INPE, 2011b. 110 p. Relatório científico.
- RODRIGUES, T.; SCHOR, T. Urbanização e vulnerabilidade socioambiental em Manaus (AM). *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 21, n. 3, p. 1–18, 2019.
- SILVA, R. C. et al. Caracterização física de bacias hidrográficas urbanas na região de Manaus (AM). *Caminhos de Geografia*, v. 16, n. 56, 2015.

TUCCI, C. E. M. Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH, 2007.