



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**APLICAÇÃO DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)
PARA ANÁLISE DE INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ,
JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL.**

MARIA LUISA PALITOT REMIGIO ALVES

JOÃO PESSOA – PB

MAIO DE 2019

MARIA LUISA PALITOT REMIGIO ALVES

**APLICAÇÃO DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)
PARA ANÁLISE DE INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ,
JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL.**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Graduação em Engenharia Ambiental, da
Universidade Federal da Paraíba, Centro de
Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e
Ambiental, como um dos requisitos para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Hamilcar José Almeida
Filgueira.

JOÃO PESSOA – PB

MAIO DE 2019

A474a Alves, Maria Luisa Palitot Remígio.

APLICAÇÃO DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE
(HAND) PARA ANÁLISE DE INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO CUIÁ, JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL. / Maria
Luisa Palitot Remígio Alves. - João Pessoa, 2019.
54 f. : il.

Orientação: Hamilcar José Almeida Filgueira.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT.

1. modelo hidroestático. 2. inundação urbana. 3. risco
de desastres. I. Filgueira, Hamilcar José Almeida. II.
Título.

UFPB/BC

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIA LUISA PALITOT REMIGIO ALVES

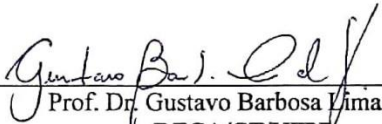
**APLICAÇÃO DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)
PARA ANÁLISE DE INUNDAÇÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ,
JOÃO PESSOA, PARAÍBA, BRASIL.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 07/05/2019 perante a seguinte Comissão Julgadora:



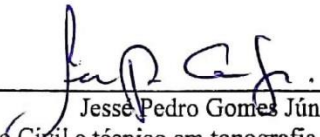
Prof. Dr. Hamílcar José Almeida Filgueira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UEPB

APROVADA



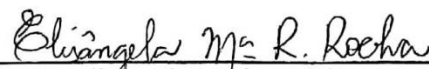
Prof. Dr. Gustavo Barbosa Lima Silva
DECA/CT/UEPB

APROVADO



Jesse Pedro Gomes Júnior
Engenheiro Civil e técnico em topografia do DECA/CT/UEPB

APROVADA



Profa. Elisângela Maria Rodrigues Rocha
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Elisângela M. R. Rocha
Coordenadora de Eng. Ambiental
CT/UEPB – Mat. 1821373

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus por todas as graças alcançadas ao longo desta caminhada desafiadora, pelas vitórias e também pelas derrotas, ensinando-se a me reerguer e a dar sempre melhor de mim.

Aos meus pais, Kallina Lígia Palitot Remígio e Saulo da Nóbrega Alves (*In memoriam*) por todo afeto, cuidado e renúncias em prol de minha formação pessoal e profissional, dedico a vocês todo o esforço e dedicação para a conclusão desta graduação que tanto me orgulho!

Aos meus irmãos Caio Palitot e Cyro Palitot por todo zelo e apoio às minhas escolhas e ao meu namorado Júlio Ventura pelo carinho, ajuda e compreensão, obrigada por tudo.

Ao meu orientador Hamilcar Filgueira por toda dedicação ao cumprimento deste trabalho que juntos abraçamos o desafio de aprender mais sobre o tema e que, além de ótimo professor, é uma pessoa admirável!

A Jessé Pedro Gomes Júnior pelo auxílio em campo necessário ao trabalho e à Luiz Eduardo Lucena por toda ajuda mútua para melhor compreensão acerca do tema.

A todos os professores que ao longo do curso contribuíram positivamente para a minha formação, em especial, às professoras Elisângela Rocha, Ana Cristina Souza e Carmem Gadelha pelo aprendizado adquirido em seus projetos de pesquisa e de extensão.

Aos membros da banca professor Gustavo Barbosa L. Silva e Jessé Pedro Gomes Júnior por terem aceitado o convite para compor a mesa avaliadora e por todas as considerações realizadas ao trabalho para aprimorá-lo.

Aos amigos que ganhei durante a graduação: Adrielle Carneiro, Artur Ypiranga, Elda Ferraz, Daniela Fernandes, Deborah Lima, Jefferson Alisson Gomes, Josivaldo Lucas Galvão, Tallyson Tavares e Thalita Raquel Pereira. Agradeço por todo o apoio e amizade construída ao longo do curso e que espero levar para a vida! Também agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado!

A Roberto Goerl por todo conhecimento compartilhado e disposição a ensinar.

À Defesa Civil por todo o auxílio e pelo acompanhamento à área de estudo para o cumprimento do trabalho.

RESUMO

Nas últimas décadas, o número de pessoas que vêm sofrendo prejuízos e danos causados pelas inundações cresceu consideravelmente decorrente do crescimento populacional desenfreado, da má gestão dos recursos hídricos e dos sistemas de drenagem, causando, assim, danos sociais, econômicos e ambientais. Com o advento de novas tecnologias, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são capazes de gerar Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução, ferramenta indispensável para a formulação de modelos hidrológicos, cada vez mais utilizados na previsão e prevenção dos eventos de inundação. Um desses modelos é o HAND, algoritmo desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que normaliza a rede de drenagem, tornando-a o ponto de referência topográfico e que irá indicar áreas inundáveis a partir de eventos históricos, ou seja, quanto mais próximo um local estiver de um canal e quanto menor for a diferença altimétrica entre eles, mais propenso este estará a inundar. Foi escolhida como área de estudo um trecho da bacia hidrográfica do rio Cuiá, localizada no município de João Pessoa-PB, que apresenta nesta região pontos críticos de inundação. Por meio de voos realizados com o VANT, foi processado o Modelo Digital de Terreno (MDT), dado de entrada para a formulação do modelo HAND e, a partir deste modelo corrigido e da área acumulada, foi definido o limiar da área de drenagem da região com base na drenagem local. Através de conversas informais e de visitas à área de estudo, foram coletados pontos de inundação nas residências antes da dragagem realizada no rio, necessários para a representação do modelo. Como resultados, fez-se a análise das áreas inundáveis antes e após a dragagem. Na primeira simulação, antes da dragagem, os pontos de inundação coletados no local foram inundados, conseguindo o modelo prever a inundação da região; na segunda simulação, após a dragagem, os pontos ditos inundáveis não foram atingidos pela elevação do rio, mostrando que a dragagem foi eficiente para esses pontos, contudo não impedindo que pontos mais próximos ao rio fossem afetados. Além disso, residências instaladas no interior da faixa da Área de Preservação Permanente (APP) foram atingidas pelas simulações de inundação. Dessa forma, o estudo foi capaz de prever a área de inundação em um trecho do rio Cuiá, recomendando-se uma maior fiscalização da Defesa Civil municipal na área, assim como um trabalho de educação ambiental com os moradores para conviverem harmonicamente com o rio.

Palavras-chave: modelo hidroestático; inundação urbana; risco de desastres.

ABSTRACT

In recent decades, the number of people experiencing flood damage and losses has increased considerably as a result of unbridled population growth, mismanagement of water resources and drainage systems, therefore causing social, economic and environmental damage. With the advent of new technologies, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are capable of generating High Resolution Digital Models, an indispensable tool for the formulation of hydrological models, increasingly used in the forecasting and prevention of flood events. One such model is HAND, an algorithm developed by National Institute of Space Research (INPE) that normalizes the drainage network, making it the topographic reference point and which will indicate areas flooded from historical events, that is, the closer a site is to a channel and the lower the altimetric difference between them, the more prone it will be to flood. A section of the Cuiá river basin, located in the county of João Pessoa, was selected as the study area and presents critical flood points in this region. Based on UAV flights, the Digital Terrain Model (DTM) was processed, input data for the HAND model formulation and, from this corrected model and the accumulated area, the threshold of the drainage area of the region from local drainage. Through informal conversations and visits to the study area, flood points were collected in the residences before dredging in the river, necessary for model representation. As a result, the analysis of the flood areas before and after the dredging was done. In the first simulation, before the dredging, the flood points collected in the place were flooded, being able to predict the flood of the region; in the second simulation, after the dredging, the flooded points were not reached by the elevation of the river, showing that the dredging was efficient for these points, but did not prevent points closer to the river being affected. In addition, residences installed within the permanent preservation area range were affected by flood simulations. Thus, the study was able to predict the flood area in a section of the Cuiá river, recommending a greater supervision of municipal Civil Defense in the area, as well as environmental education work with the residents to live harmoniously with the river.

Key words: hydrostatic model; urban flood; risk of disasters

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Características das alterações de uma área rural para urbana. Fonte: Schueler (1987) apud SUDERHSA (2000).....	15
Figura 2: Simulação do HAND (com curvas de nível a cada 5 metros), com o contorno da mancha de inundação dos rejeitos depositados (linha em preto). Quadrados brancos são edificações. Fonte: OBT (2019).	23
Figura 3: Mapa da localização da bacia hidrográfica do rio Cuiá	25
Figura 4: Histórico de eventos ocorridos em João Pessoa-PB entre 2000 e 2016. Fonte: BRASIL (2018). Organização: autora.	27
Figura 5: Notícia da inundação do dia 31 de agosto de 2013 na ladeira que os bairros de Mangabeira e Valentina, em João Pessoa-PB. Fonte: Correio da Paraíba.	28
Figura 6: Delimitação da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Cuiá. Fonte: autora.	29
Figura 7: Imagem aérea do <i>drone</i> da área de estudo. Fonte: autora.	29
Figura 8: Registro da área de estudo no dia 13 de fevereiro de 2019 sobre a ponte do rio Cuiá, ligando a rua Francisco Porfírio Ribeiro, no Bairro de Mangabeira à rua Brasilino Alves da Nóbrega, no Bairro do Valentina: a) e b) representam as margens à montante da ponte e c) e d) representam as margens à jusante da ponte. Fonte: autora.	30
Figura 9: Realização do plano de voo. a) Operação do <i>drone</i> no ponto de partida do voo 1; b) Modelo DJI Phantom 4 Pro retornando ao ponto de partida do voo 2. Fonte: autora.	31
Figura 10: Etapas para a consistência hidrológica do MDT: a) consistência hidrológica; b) determinação da direção de fluxo; c) extração da rede de drenagem. Fonte: Nobre et al. (2011) adaptado por Goerl et al. (2017b).	34
Figura 11: Processamento do modelo HAND. Fonte: Rennó et al. (2008).	36
Figura 12: Modelo Digital de Superfície da área de estudo. Fonte: autora.	37
Figura 13: Modelo Digital de Elevação da área de estudo. Fonte: autora.	38
Figura 14: Mapa da drenagem do rio Cuiá e do limiar escolhido.	39
Figura 15: Pontos de inundação na área de estudo: a) marca d'água na parede externa de uma residência em uma comunidade próxima ao rio (11/04/19); b) marca da água na parede externa de uma residência próxima à ponte; c) marca da água na parede no interior de uma residência próxima à ponte (15/01/19). Fonte: a) e b) registradas pela autora; c) imagem do Google Street View.	40
Figura 16: Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo antes da dragagem do rio Cuiá utilizando o modelo HAND. Fonte: autora.	41

Figura 17: Mancha de inundação do modelo HAND com elevação de 3 m sobreposta à região do voo 1 da área de estudo. Fonte: autora.	42
Figura 18: Mancha de inundação do modelo HAND com elevação de 2 m sobreposta à região do voo 2 da área de estudo. Fonte: autora.	43
Figura 19: Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo depois da dragagem do rio Cuiá utilizando o modelo HAND. Fonte: autora.	44
Figura 20: Sobreposição da mancha de inundação gerada pelo HAND de até 2 m de elevação e delimitação da APP às margens do rio. Fonte: autora.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
APP	Área de Preservação Permanente
COPAM	Conselho de Proteção Ambiental
CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disaster
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HAND	<i>Height Above the Nearest Drainage</i>
INPA	Instituto Nacional de Pesquisas na Amazônia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
LDD	<i>Local Drain Directions</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
PMSB-JP	Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disasters Reduction</i>
UTM	<i>Universal Transversa de Mercator</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	14
3.1 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE A REDE DE DRENAGEM	14
3.2 INUNDAÇÕES E IMPACTOS NAS ÁREAS URBANAS.....	16
3.3 VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO RIBEIRINHA.....	17
3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA.....	18
3.4.1 Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)	18
3.4.2 Modelo Digital de Elevação.....	20
3.4.3 Modelo HAND	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ – JOÃO PESSOA/PB.....	25
4.1.1. Delimitação da área de estudo	28
4.2 PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO	31
4.3. APLICAÇÃO DO MODELO HAND EM TRECHO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ	32
4.3.1 Direção do fluxo de drenagem e correção do MDT	33
4.3.2 Definição da rede de drenagem	34
4.3.3 Topologia do HAND	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1 Primeira simulação	40
5.2 Segunda simulação	43
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
7 REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o número de pessoas que vêm sofrendo prejuízos e danos causados pelas inundações e alagamentos cresceu consideravelmente (GOERL et al., 2017a), decorre isso muitas vezes do crescimento populacional desenfreado onde mais pessoas estão habitando locais propensos a ocorrência de fenômenos de caráter hidrológico, como planícies de inundação e encostas (GOERL & KOBİYAMA, 2013), bem como da má gestão dos recursos hídricos, dos sistemas de drenagem e de resíduos sólidos, onde poderá ocasionar problemas sanitários, inundações e deslizamentos. (UNISDR, 2012).

Nesse sentido, o ano de 2018 foi de grande ocorrência de desastres, com cerca de 60 milhões de pessoas afetadas, destacando-se os relacionados à inundação que, somente neste ano, 35 milhões de pessoas foram atingidas em todo o mundo. (UNISDR, 2019). Esses números são justificados pelo fato de civilizações terem se instalado e se desenvolvido próximas aos rios, comumente em sua planície de inundação, causando transtornos e conflitos de interesse entre o homem e a natureza. (MACKLIN & LEWIN, 2015; ZANANDREA et al., 2017).

No Brasil, os desastres se destacam principalmente devido aos eventos de precipitação intensa agravados pela alta vulnerabilidade que se encontra a população em constante exposição aos riscos de inundação. (MILANESI et al., 2017). Todavia, quando o homem se estabelece onde esses processos naturais ocorrem, são causados danos sociais, econômicos e ambientais.

Para conter as inundações – muitas vezes intensificadas pela ação humana como o assoreamento dos leitos dos rios - são utilizadas medidas preventivas, sendo estas divididas em estruturais ou não estruturais. As medidas estruturais, como diques, barragens, alargamento de rios, são comumente utilizadas para conter eventos de menor frequência, com maior tempo de retorno. Já as medidas não estruturais, segundo Kobiyama et al. (2006), geralmente envolvem planejamento e gerenciamento, como o zoneamento ambiental e sistemas de alerta à população já estabelecida em áreas vulneráveis à ocorrência desses eventos e se destacam pelo seu baixo custo e relativa facilidade de utilização, pois comumente se realizam mapeamentos para identificar áreas propensas à ocorrência de inundações e, para isso, são frequentemente empregadas metodologias que realizam um levantamento da localização das superfícies atingidas pela inundação para a cota máxima de enchente. (MOMO et al., 2016).

Com o advento de novas tecnologias em geoprocessamento e sensoriamento remoto, torna-se cada vez mais viável sua utilização para a previsão e prevenção de inundações entre outros tipos de desastres. Um exemplo é a utilização Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), que são capazes de imagear grandes áreas em um curto espaço de tempo e sem necessitar de uma grande equipe. Os VANTs também são capazes de gerar modelos digitais de elevação de altíssima resolução espacial, ferramenta indispensável para a formulação de modelos hidrológicos.

Um modelo hidrológico para simulação de inundações foi desenvolvido recentemente por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), modelo de terreno denominado HAND - *Height Above the Nearest Drainage*, ou seja, altura acima da drenagem mais próxima. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011). Esse algoritmo é capaz de estimar a extensão máxima em uma inundação estacionária a partir da descrição do terreno e necessita apenas de um dado de entrada, o Modelo Digital de Elevação (MDE), em que este é normalizado de acordo com as distâncias verticais distribuídas em relação aos canais de drenagem e da definição do limiar de drenagem referente a cada região. (NOBRE et al., 2011; NOBRE et al., 2016).

Basicamente, Nobre et al. (2011) definiram a altura da rede de drenagem mais próxima como referência topográfica e classificaram as áreas de acordo com a saturação da água no solo pela indicação da altura local relativa a cada localidade, desconsiderando como referência a altura do nível do mar. Dessa forma, é possível realizar o mapeamento de áreas apenas com dados do próprio terreno, e estimar até que ponto a água é capaz de alcançar em uma inundação.

Esse modelo possui a grande vantagem de depender de poucos dados de entrada para a sua formulação e por possuir um processamento de dados relativamente rápido. Isso é de grande utilidade para a gestão das áreas propensas a inundar, tanto em localidades já habitadas, quanto em regiões não ocupadas, permitindo um zoneamento eficiente de áreas que não deveriam ser adensadas nas cidades.

Buscou-se neste estudo verificar o nível que uma possível inundação alcançaria em um trecho urbano da bacia hidrográfica do rio Cuiá antes e após a realização de uma dragagem, localizado no município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba. Durante o período chuvoso, o trecho escolhido corriqueiramente é inundado, congestionando via de intenso tráfego da cidade e afetando algumas residências próximas ao canal principal. Portanto, os

resultados do mapeamento de inundação desse local poderão contribuir positivamente nos trabalhos da Coordenadoria de Proteção e Defesa Civil do município.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso de imagens de alta resolução espacial para fins de mapeamento da inundação de um trecho da bacia hidrográfica do Rio Cuiá – João Pessoa/PB a partir de eventos de inundação históricos.

2.2 Objetivos Específicos

- Identificar os pontos em que a população encontra-se em vulnerabilidade;
- Desenvolver um Modelo Digital de Elevação de alta resolução espacial que permita uma maior precisão nos resultados;
- Verificar a eficiência da dragagem realizada na área de estudo em relação aos pontos de inundação coletados em campo;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 IMPACTOS DA URBANIZAÇÃO SOBRE A REDE DE DRENAGEM

Quando a bacia hidrográfica não se encontra em ambiente urbano, as águas fluem normalmente em seu ciclo hidrológico natural, realizando diferentes processos químicos, físicos e biológicos. As águas pluviais alimentam os reservatórios subterrâneos por meio da infiltração e, somente quando o solo é saturado, ocorre o escoamento superficial direcionado à rede de drenagem mais próxima. (TUCCI, 2005). Em um cenário de bacia urbanizada, há alterações no ciclo hidrológico, fazendo com que hajam modificações no curso natural da água. Ações como impermeabilização de ruas, supressão da vegetação, construção de edificações, criação de canais artificiais e de reservatórios, promovem perda das características naturais dos rios, redução na porcentagem da água infiltrada no solo e diminuição da evapotranspiração, o que resulta no aumento no volume e na velocidade do escoamento superficial, conseqüentemente, elevando as vazões máximas e antecipando o tempo de pico da vazão. (TUCCI, 2005; SILVA, et al., 2007; ZUFFO, 2007).

Segundo Zuffo (2007), “drenagem é o termo dado ao sistema natural ou artificial condutor de água pluvial ou subterrânea para fora de uma determinada área” e, quando há a interferência da urbanização, deve-se levar em consideração a topografia do terreno e desenhar um sistema de drenagem semelhante à dinâmica natural das águas.

Mesmo depois de construído um sistema de drenagem artificial que se aproxime da topografia original, deve ser previsto o impacto devido ao acúmulo de resíduos sólidos nos canais de drenagem. Dependendo do estágio de desenvolvimento urbano, o solo fica desprotegido pela retirada da cobertura vegetal e a produção de lixo aumenta com crescimento populacional; os sedimentos são transportados pelo escoamento superficial ocasionando o assoreamento do leito dos rios, e os resíduos sólidos mal gerenciados são levados pelo sistema de drenagem, afetando a qualidade dos corpos hídricos. (TUCCI, 1997; TUCCI, 2002).

Dessa forma, devido à impermeabilização das cidades, uma porcentagem significativa da água não infiltra no solo e escoam superficialmente para o canal de drenagem mais próximo. Esse escoamento segue para jusante do local de geração do escoamento e é somado ao escoamento mais a frente, superando a enchente natural desse canal e chegando ao ponto de inundar as margens e atingir moradores. Para evitar essa problemática, comumente são construídos

canais artificiais, alargando o leito do rio, o que irá solucionar o problema da inundação neste local, contudo a inundação será transferida para jusante, afetando outra parte da população. (TUCCI, 2005; PINHEIRO, 2007). São mostradas na Figura 1 as alterações do uso do solo devido à urbanização, o efeito sobre o hidrograma a partir dessa mudança e os níveis de inundação.

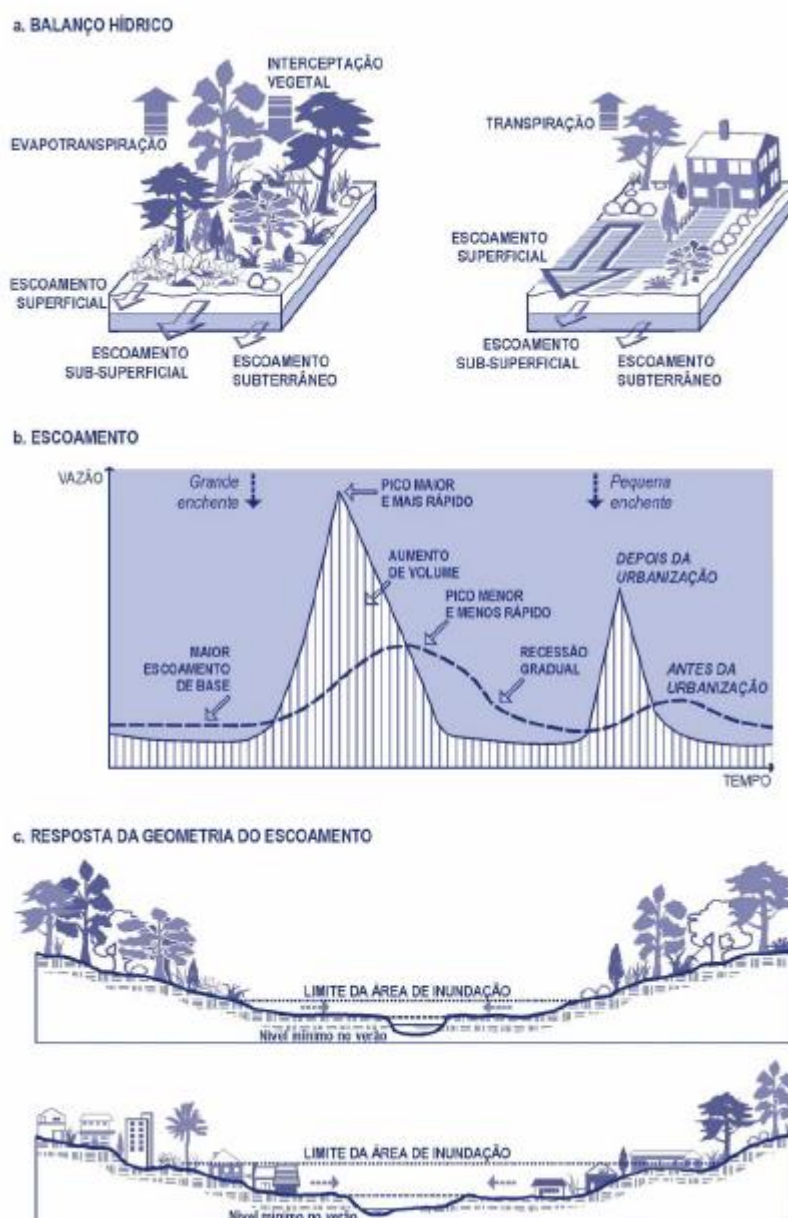


Figura 1: Características das alterações de uma área rural para urbana. Fonte: Schueler (1987) apud SUDERHSA (2000).

3.2 INUNDAÇÕES E IMPACTOS NAS ÁREAS URBANAS

A seção transversal de um curso d'água pode ser dividida em canal principal e canal secundário. Conceitualmente, a inundação (popularmente tratada como enchente) é uma condição na qual o nível do rio se eleva acima de seu nível normal, deixando de escoar somente pelo canal principal e extravasa, passando a ocupar também o canal secundário (também conhecido como planície de inundação) em certos intervalos de tempo. Quando não há transbordamento do leito do rio, trata-se de uma enchente e não de uma inundação e a frequência com que esta ocorre está diretamente ligada às modificações na bacia hidrográfica. (KOBIYAMA et al., 2006; PINHEIRO, 2007).

As inundações ribeirinhas são processos naturais do ciclo hidrológico que ocorrem quando a precipitação é tão intensa que ultrapassa a capacidade de escoamento da água pelo leito menor (canal principal), passando a escoar também pelo leito maior (canal secundário). Esses eventos ocorrem em chuvas de menor frequência e de forma aleatória, a depender dos processos climáticos locais e regionais. (TUCCI, 2005).

De acordo com Castro (2003), as inundações podem ser divididas entre graduais e bruscas. As inundações graduais elevam-se de forma facilmente previsível, normalmente são cíclicas e ocorrem de forma sazonal. Estão relacionadas a chuvas contínuas por períodos prolongados e são características das grandes bacias hidrográficas. Em contrapartida, as inundações bruscas, também chamadas de enxurradas, são caracterizadas por chuvas intensas, concentradas e violentas elevações do nível do rio que passa a escoar de forma rápida e intensa. Esse fenômeno possui menor previsibilidade e ocorre normalmente em bacias hidrográficas de pequeno e médio porte, o que causa grandes danos materiais à população e, em alguns casos, perdas humanas.

As civilizações ocuparam durante toda história as margens dos rios para dar início às pequenas comunidades, até desenvolverem-se as grandes metrópoles com suas complexidades e diferentes estratificações da sociedade. A pressão da ocupação humana exercida nas grandes cidades tem feito com que populações com baixa capacidade de resiliência ocupem áreas que interferem e consequentemente intensificam a dinâmica dos processos naturais. (UNISDR, 2012; MOURA, 2016).

Com a urbanização, os lotes melhor localizados nas cidades valorizam a ponto de pressionar a população mais carente a ocupar áreas impróprias e propiciam a formação de aglomerados

subnormais, sem a devida infraestrutura de serviços básicos, como água tratada, coleta de esgoto e coleta de resíduos sólidos. Outro fator condicionante para a formação de ocupações irregulares é a negligência do poder público no planejamento territorial a longo prazo, dando preferência a obras de grande visibilidade. (ZAHED FILHO et al., 2012).

3.3 VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO RIBEIRINHA

Segundo o Escritório das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres (UNISDR, sigla em inglês para *United Nations International Strategy for Disasters Reduction*), pesquisas realizadas pelo Centro de Pesquisa da Epidemiologia de Desastres (CRED) revelaram que quase 60 milhões de pessoas foram atingidas no mundo em 2018 por fenômenos climáticos extremos, dentre as quais cerca de 35,5 milhões de pessoas foram afetadas por inundações em todo o mundo no mesmo ano, e 2.859 pessoas perderam suas vidas. Esses números são alarmantes e requerem dos gestores políticas mais assertivas no gerenciamento dos desastres. (UNISDR, 2019).

A intensificação dos prejuízos causados por desastres relacionados a fenômenos naturais nos últimos anos no Brasil, bem como em diversas partes do mundo, deve-se principalmente, ao mau planejamento da expansão territorial urbana. Muitas cidades brasileiras não possuem um sistema estruturado eficaz de uso e ocupação do solo, deixando parte da população vulnerável às adversidades climáticas. (FILGUEIRA et al., 2009).

O desastre é considerado um evento adverso provocado pela interferência do homem em um ecossistema vulnerável e que causa a interrupção das atividades de uma comunidade, trazendo prejuízos como perdas humanas, impactos materiais, econômicos, ambientais e que excedem a capacidade da sociedade enfrentar a situação sem necessitar de apoio externo. (CASTRO & CALHEIROS, 2007; UNISDR, 2009). O risco é a probabilidade de uma perda esperada em uma área habitada em determinado período de tempo. (UNDP, 2004 apud KOBAYAMA et al., 2006).

Segundo Vargas (2002), risco de desastres “é a magnitude provável de dano de um ecossistema específico, em um período determinado, ante à presença de uma atividade específica com um potencial perigoso”. Para que haja risco de desastre, é necessária a presença de dois fatores condicionantes: a ameaça e a vulnerabilidade. Entende-se por ameaça

a magnitude e a duração de um evento detonador ou desencadeante, podendo ser de origem natural ou incitado pela ação humana em uma determinada região (VARGAS, 2002), enquanto que a vulnerabilidade “é a predisposição intrínseca do sujeito ou elemento sofrer um dano devido a possíveis ações externas”. (CARDONA, 1993).

Como já dito, as medidas de controle e/ou prevenção de inundações buscam minimizar os danos causados à população a partir de desastres. As medidas estruturais, apesar de eficientes, oferecem uma falsa sensação de segurança à população por os eventos terem se tornado menos frequentes, fazendo com que continuem ocupando locais suscetíveis a ocorrência de desastres. (GOERL & KOBİYAMA, 2013). Já as medidas não estruturais estão ligadas a ações de planejamento e gerenciamento propiciando a convivência da população com as inundações, apresentando vantagem sobre as medidas estruturais na relação custo-benefício. (KOBİYAMA et al., 2006).

De acordo com Tucci (2005), “o controle da inundação é obtido por uma combinação de medidas estruturais e não-estruturais que permita à população ribeirinha minimizar suas perdas e manter uma convivência harmônica com o rio”. Uma gestão eficiente para redução de risco a desastres nessas áreas é imprescindível para o bem estar da população residente em áreas suscetíveis à inundação. Sendo assim, a Lei nº 12.608/2012 correspondente à Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) estabelece medidas a serem tomadas antes, durante e após a ocorrência do desastre, que são ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação voltadas à proteção e defesa civil. (BRASIL, 2012).

3.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

3.4.1 Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs)

VANT vem da abreviação em português para *Unmanned Aerial Vehicles* (UAVs), sendo definido como: “Veículos aéreos que não carregam operador humano, utilizam forças aerodinâmicas para se elevar, podem voar autonomamente ou serem pilotados remotamente, podem ser descartáveis ou recuperáveis e podem transportar cargas bélicas ou não bélicas”. (DOD, 2016).

De acordo com Braz et al. (2015) e Antunes & Hollatz (2015), os VANTs vêm ganhando espaço em diversos setores da sociedade por ser uma tecnologia com grande agilidade no

processamento de imagens de alta resolução espacial, com resultados praticamente em tempo real. Essa tecnologia se faz necessária em levantamentos de áreas que exigem informações mais detalhadas e que também podem ser ofertadas a baixo custo, comparado a imagens de satélites que não são de domínio público. O Departamento de Defesa dos Estados Unidos, por exemplo, vem desenvolvendo novas tecnologias e políticas para ofertar mais autonomia a seus sistemas não tripulados a fim de reduzir a carga de mão de obra, não oferecer tantos riscos aos operadores e obter informações com maior agilidade. (DOD, 2014).

Os VANTs englobam *drones*, balões, dirigíveis, pequenos aviões, originalmente desenvolvidos para aplicações militares para monitoramento, espionagem, mas que com o tempo alguns deles foram adaptados para usos civis que necessitavam altas resoluções espaciais de uma área e hoje também estão sendo largamente utilizados para estudos ambientais com maior acurácia. (LONGUITHANO, 2010; KLEMAS, 2015).

O termo *drone* é aplicado para VANTs que normalmente fazem uso mais acentuado da robótica, além de sua operação ser mais autônoma. (LONGUITHANO, 2010). Existem muitos modelos no mercado, e a escolha de qual equipamento usar irá depender do nível de detalhamento do estudo em questão. Para aplicações hidráulicas, são muito utilizados os pequenos multi-rotores, capazes de capturar imagens aéreas e realizar levantamento detalhado do terreno, gerando Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução espacial, muito utilizados na modelagem hidrodinâmica. (KLEMAS, 2015).

Um exemplo de *drone* de notável custo benefício é o Phantom 4 Pro da empresa DJI, que possui uma câmera acoplada com sensor de 20 megapixels, capaz de gerar um pixel com resolução de 27,5 mm a uma elevação de 100 m do terreno. Além do tamanho do sensor, a qualidade das imagens geradas é determinada pela velocidade e altura do voo, a correta sobreposição de imagens e a luz do meio. (BIGGS, 2019).

Em contrapartida, há a desvantagem na utilização dos *drones* por não serem de fácil acesso a todos como as imagens de satélites de resolução espacial mais baixa, principalmente pelo seu custo de aquisição e da necessidade de licença para operá-lo. Também há a limitação de não cobrirem áreas muito extensas como em escala regional, sendo mais utilizados, portanto, em trabalhos de escala local.

3.4.2 Modelo Digital de Elevação

De uma forma geral, o Modelo Digital de Elevação (MDE) pode ser considerado qualquer representação digital com uma variação contínua da superfície terrestre no espaço, e a modelagem dessa superfície permite representá-lo por meio de um método ou modelo matemático em um plano cartográfico, sendo os eixos x e y representantes das coordenadas geográficas e o eixo z representando o valor da altura nessa posição. (CHAVES, 2002; GAROFALO & LIESENBERG, 2015). Ele consiste na representação numérica da topografia sendo atribuído a cada pixel, ou célula, um valor altimétrico correspondente em relação a determinado referencial. (CHAPLOT, 2006; CASTRO et al., 2015).

Alguns autores fazem a separação do MDE entre Modelo Digital de Terreno - MDT (em inglês, *Digital Terrain Model*) e Modelo Digital da Superfície - MDS (em inglês, *Digital Surface Model*). O MDT corresponde a um modelo no qual é levado em consideração a representação pura do terreno, sem topos de prédio e/ou vegetações. (PACHECO et al., 2011) Ele também pode referir-se a outras características geográficas além da altimetria, e que permitem especializar grandezas como temperatura, pressão, nível de poluição entre outras variáveis. (BURROUGH, 1986).

O MDS representa a superfície do terreno acrescida a todos os elementos acima dele, como copas das árvores e edificações presentes em uma imagem, gerados através da reflectância do pixel representando um valor de altitude. (CRUZ et al., 2011; EGG et al., 2013). Ele possui grande utilidade ao acompanhar, por exemplo, o desenvolvimento de uma cultura, pois possibilita observar a altitude da vegetação, contagem de plantas, além de extrair curvas de nível do terreno, sua declividade, dados hidrológicos entre outras utilidades. (CANDIDO et al., 2014).

O MDE, de maneira geral, pode ser gerado a partir de estereopares de imagens de sensores remotos orbitais e/ou aerotransportados. (LUIZ et al., 2007; GAROFALO & LIESENBERG, 2015). As imagens geradas pela missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) que cobriu cerca de 80% do globo terrestre são largamente utilizadas, visto que são de acesso livre e permitem a geração dos MDEs de alta resolução. (FARR et al., 2007). A representação do MDE pode ser feita por formato matricial (*raster*) ou TIN (*Triangulated Irregular Network*), sendo o formato raster o mais utilizado por sua simplicidade de armazenamento e as coordenadas x e y estarem explícitas na matriz. (TRIBE, 1992; CHAVES, 2002).

Outra forma de obtenção do MDE é por meio da aerofotogrametria, com sensores acoplados em aviões tripulados ou por VANTs, em especial os *drones*, com câmeras de alta resolução espacial capazes de gerar modelos digitais de enorme precisão. (TSCHIEDEL et al., 2018). O grande benefício da aerofotogrametria em relação aos demais métodos convencionais topográficos é a geração de uma alta densidade de pontos, nuvens de pontos 3D e a geração do MDS, do MDT e de ortofotos de altíssima qualidade como produto final. Também há a vantagem financeira do tempo de execução, pois é possível mapear uma grande área em um curto espaço de tempo e com uma equipe menor quando comparada a uma equipe de topografia. (CANDIDO et al., 2014; RODRIGUES & GALLARDO, 2018).

3.4.3 Modelo HAND

O HAND é um algoritmo utilizado para estimar a inundação de determinado local utilizando o MDE como dado de entrada. Além do modelo digital de elevação, é necessário definir um limiar de drenagem coerente com a área de estudo. Conceitualmente, o HAND irá zerar a altitude do canal de drenagem, não tomando mais o nível do mar como referência, passando a ser a rede de drenagem principal a referência topográfica relativa plana. Logo, o modelo terá como saída alturas normalizadas que serão divididas em classes, e que irão ser definidas com base em dados de campo ou conhecimento do terreno local gerando, assim, mapas de inundação do terreno. (RENNÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011).

Em síntese, o HAND é um equivalente normalizado pela rede de drenagem de um MDT (MOMO et al., 2016) e, quanto mais próximo um local estiver de um canal e menor for a diferença altimétrica entre eles, mais propenso este local está a inundar (GOERL et al., 2017b).

Os desenvolvedores do HAND, Rennó et al. (2008) e Nobre et al. (2011), aplicaram este modelo na floresta amazônica para determinar as áreas inundáveis e, para isso, fizeram uso de imagens SRTM com resolução horizontal de 90 m e vertical de 1 m para gerar o MDE, o qual foi utilizado na formulação do HAND da área. No entanto, Momo et al. (2016) afirmam que os resultados da simulação do modelo HAND está estritamente relacionado com a qualidade da resolução espacial do dado topográfico e os mesmos utilizaram modelos digitais de elevação com resolução horizontal de 1 m e resolução vertical de 0,39 m, assim como Goerl

et al. (2017a), Milanesi et al. (2017) e Zanadrea et al. (2018), a fim de obterem como resposta um modelo com maior precisão nos resultados.

Rodrigues et al. (2011) dedicaram-se a comparar os resultados do HAND com diferentes resoluções espaciais em uma área de, aproximadamente, 50.000 km², utilizando dados topográficos SRTM com resolução espacial de 30 metros e de 90 metros. Concluíram que, em estudo local, são recomendadas resoluções mais refinadas, pois resoluções menores podem suavizar demais a topografia e gerar erros; caso se esteja trabalhando em escala regional ou global, uma resolução de 90 m é mais aconselhada pelo processamento do arquivo. Goerl et al. (2017b), analisando uma área de 136 km², fizeram uso de um MDT com resolução de 2,5 m e, para testar a sensibilidade em relação à resolução espacial, reamostraram o mesmo para resoluções de 5 m, 10 m, 25 m e 50 m. Como resultado, as classes de média e alta suscetibilidade à inundação com resolução de 25 m e 50 m ficaram grosseiramente delineadas, contudo, a área total inundada apresentou poucas alterações comparando-se todas as resoluções.

Momo et al. (2016) compararam a inundação em duas cidades de Santa Catarina que possuem relevos diferenciados. Constataram que na cidade de Blumenau, em cotas de inundação mais baixas, o desempenho do HAND foi menor, onde as variações hidrodinâmicas são mais expressivas, melhorando o desempenho do modelo para regiões com cotas de inundação mais elevadas.

Esse modelo, além de prever áreas vulneráveis a desastres como inundação de rios, foi capaz de estimar a trajetória da lama a partir do rompimento de uma barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG, no início de 2019. Com o auxílio de imagens do satélite CBERS-4 (Figura 2) foi constatado que a maior parte das áreas alagadas estava na faixa de 10 m a partir do nível do rio (OBT, 2019).

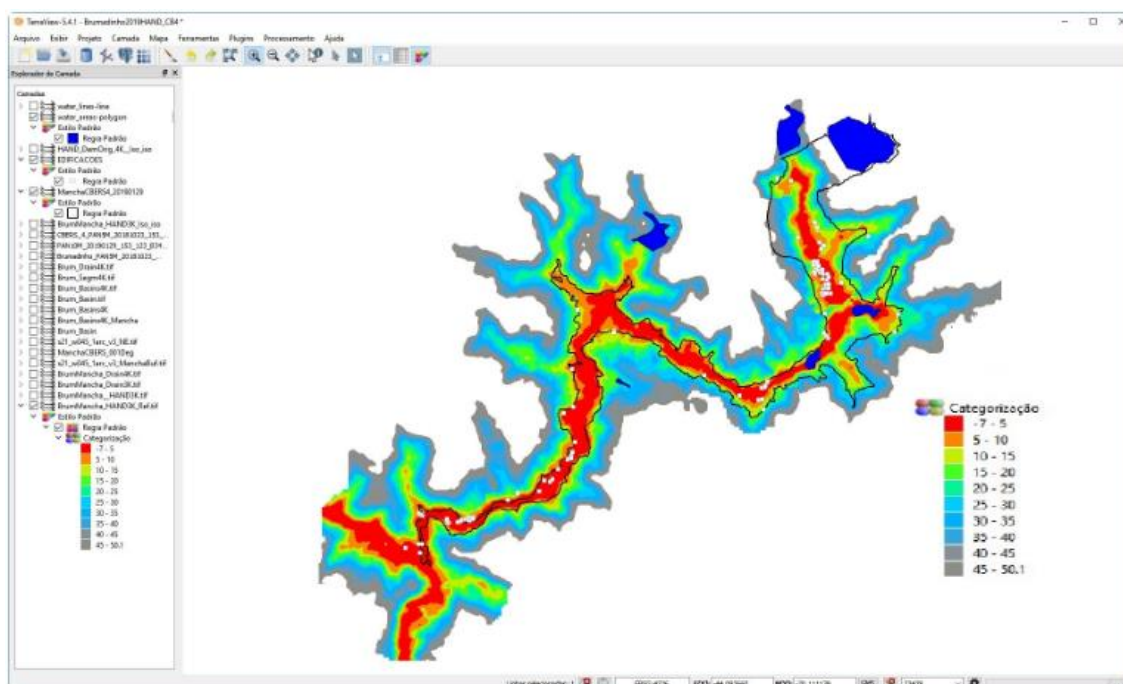


Figura 2: Simulação do HAND (com curvas de nível a cada 5 metros), com o contorno da mancha de inundação dos rejeitos depositados (linha em preto). Quadrados brancos são edificações. Fonte: OBT (2019).

Outra aplicabilidade do HAND está na avaliação da cobertura vegetal através da classificação dos solos relacionada à rede de drenagem. Lucena et al. (2017) realizaram um cruzamento entre o HAND e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) na bacia hidrográfica do rio Gramame, Paraíba, com o objetivo de obter informações mais precisas da vegetação dessa área.

Esse algoritmo vem sendo aplicado não somente no território brasileiro, mas também em diversas localidades do mundo e em diversas situações. Hong et al. (2018) utilizaram o modelo HAND (altura acima da drenagem mais próxima) como um dos dezesseis fatores condicionantes geoambientais a fim de produzir um mapa de suscetibilidade a escorregamentos em Anfu Couty, China. Como resultado, o HAND mostrou-se um dos cinco fatores escolhidos como principais influenciadores no deslizamento, pois manifestava um padrão mais claro com relação à ocorrência de escorregamentos em comparação a outros fatores hidrológicos.

O modelo também foi utilizado no Canadá por McGrath et al. (2018) que fizeram um comparativo entre três modelos conceituais simplificados de inundação, entre eles o HAND. Foi avaliada a precisão e desempenho desses modelos a partir de duas inundações históricas

utilizando como critério extensão da inundação, profundidade da água e tempo de processamento dos dados. Com resultado, verificou-se que o HAND foi o que melhor simulou a extensão da inundação com Probabilidade de Detecção e Índice de Sucesso Crítico acima de 90%.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ – JOÃO PESSOA/PB

A bacia hidrográfica do rio Cuiá está localizada no Sul do litoral paraibano, totalmente inserida no município de João Pessoa, no Estado da Paraíba, entre as coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) 9.210.000mN / 302.000mE e 9.200.000mN / 292.000mE. A bacia é delimitada a Norte com a bacia hidrográfica do rio Jacarapé, ao sul com a bacia hidrográfica do rio Gramame, a Oeste pelo conjunto habitacional Ernany Sátiro e a Leste pelo Oceano Atlântico. O clima local é do tipo tropical úmido e possui pluviosidade média anual de 2.000 mm, com temperatura média entre 26°C e 27°C. (REIS, 2010). A Figura 3 mostra a localização da bacia hidrográfica do rio Cuiá.

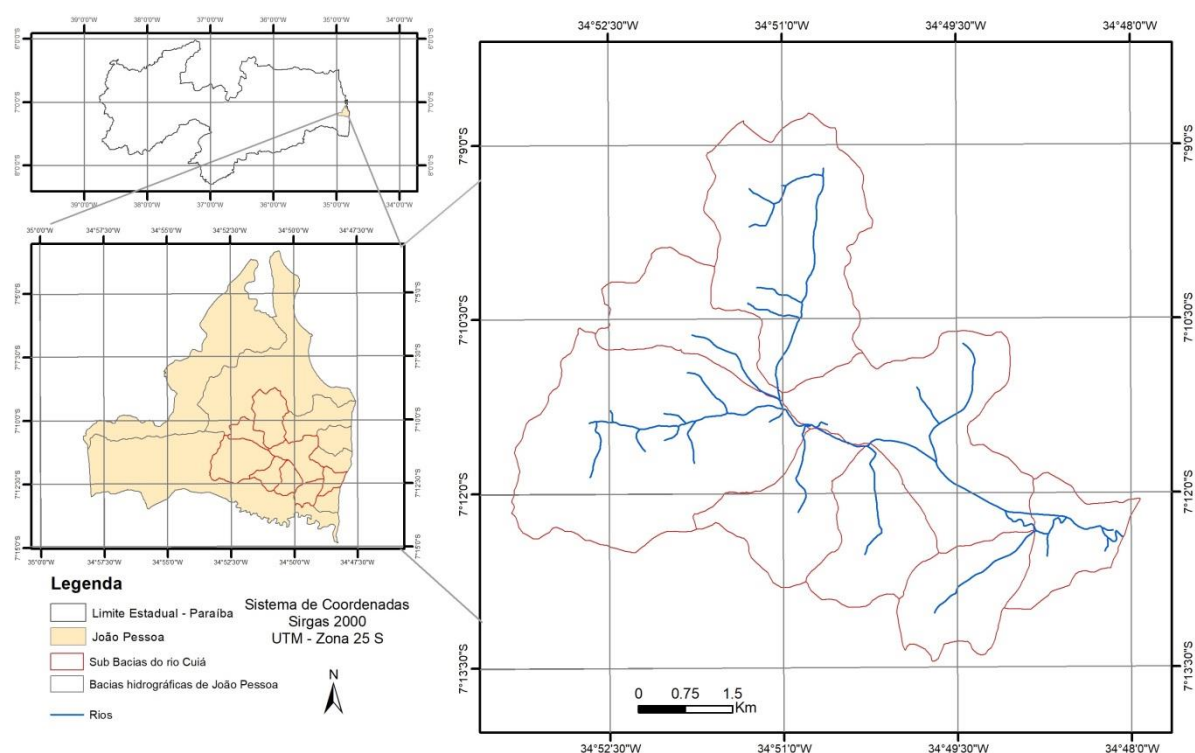


Figura 3: Mapa da localização da bacia hidrográfica do rio Cuiá

A bacia de drenagem detém uma área de 40,15 km² dividida em oito sub-bacias e seu afluente principal possui 10,97 km de comprimento. A principal nascente do rio Cuiá está localizada no conjunto habitacional do Grotão e deságua na superfície costeira da Praia do Sol. Quanto

ao enquadramento do rio em classes de uso realizado pelo Conselho de Proteção Ambiental (COPAM), o rio Cuiá é considerado de Classe 1 de sua nascente até a confluência com o rio Laranjeiras e de Classe 2 do encontro com o rio Laranjeiras até a sua foz. (REIS, 2010; PARAÍBA, 2015).

De acordo com Paraíba (2015), que trata do Plano Municipal de Saneamento Básico do município de João Pessoa – PMSB-JP, a zona urbana do município apresenta um grande número de áreas propensas a inundações, alagamentos e movimentos de massa, sendo apontada uma área de inundação recorrente na bacia hidrográfica do rio Cuiá, mais precisamente localizada na rua Brasilino Alves da Nóbrega (divisa entre os bairros de Mangabeira e Valentina, trecho da ponte sobre o rio Cuiá), de coordenadas UTM 9.204.533mN / 296.887mE. Nessa localidade, foram observados 11 problemas de macrodrenagem dentre os 14 problemas de inundação listados pelo Plano de Saneamento, dentre os quais:

- Bueiro ou ponte de rio com altura ou vão insuficiente;
- Aterro clandestino ou muros no leito principal ou secundário do Sistema de Macrodrenagem (SMaD);
- Edificações ou moradias precárias no leito principal ou secundário do rio;
- Estrangulamento do leito principal do rio;
- Acúmulo de vegetação no leito principal ou secundário do rio;
- Acúmulo de resíduos sólidos ou restos de materiais de construção no leito principal ou secundário do rio;
- Defeitos na galeria ou na estrutura de descarga do SMaD;
- Presença de animais no leito principal ou secundário do rio;
- Despejo de esgotos domésticos ou industriais no rio;
- Mau cheiro das águas do rio; e
- Presença de espumas nas águas do rio.

(PARAIBA, 2015)

No período entre 2000 e 2016, de acordo com o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), João Pessoa apresentou 12 ocorrências de eventos subdivididos em cinco classes: Inundações, Estiagens, Enxurradas, Erosão Costeira e Tempestade Local/ Convectiva, ilustradas na Figura 4.

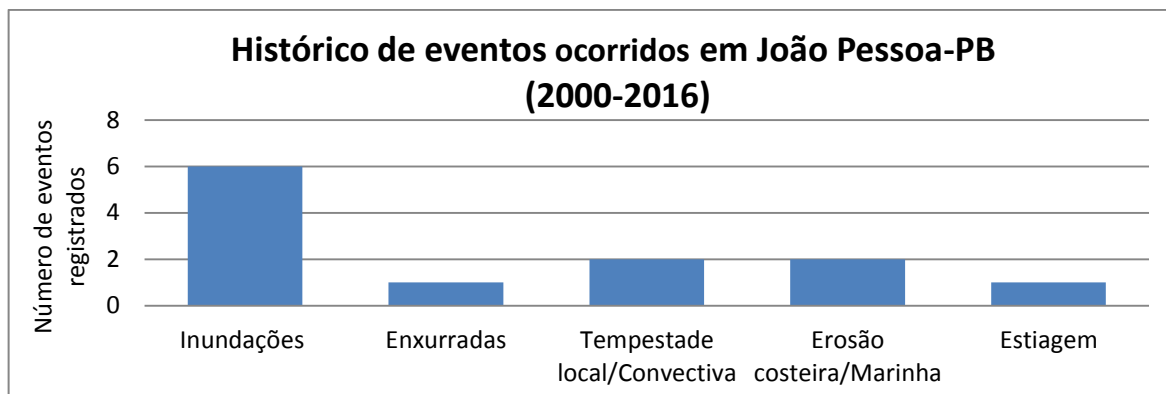


Figura 4: Histórico de eventos ocorridos em João Pessoa-PB entre 2000 e 2016. Fonte: BRASIL (2018). Organização: autora.

Nota-se que, dos 12 eventos ocorridos nesse período, metade esteve relacionado a inundações. Entre os alertas de inundação na cidade, destaca-se a inundação ocorrida no dia 31 de julho de 2013 com uma precipitação de 123,6 mm, cerca de 50% da precipitação esperada para esse mês, segundo informações da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA). No formulário com informações sobre o desastre ocorrido no dia citado acima, uma das áreas afetadas foi a bacia hidrográfica do rio Cuiá. Exatamente um mês após essa ocorrência, noticiou-se novamente uma inundação na ponte que liga os bairros de Mangabeira (rua Francisco Porfírio Ribeiro) e Valentina (rua Brasilino Alves da Nóbrega). Foi feito um recorte da notícia deste dia do Jornal Correio da Paraíba, que mostra imagens da área inundada (Figura 5).



Figura 5: Notícia da inundação do dia 31 de agosto de 2013 na ladeira que os bairros de Mangabeira e Valentina, em João Pessoa-PB. Fonte: Correio da Paraíba.

4.1.1 Delimitação da área de estudo

Para o presente estudo, optou-se por dar um enfoque maior a um trecho da bacia no qual há um maior número de ocorrências de inundação; no caso, no trecho escolhido está compreendida a ponte citada no item 4.1, segundo estudos realizados no PMSB-JP.

Como a área de estudo é considerada pequena (cerca de 1,4 km²), comparada ao tamanho da bacia, buscou-se trabalhar com um MDE de alta resolução, semelhante a Goerl et al. (2017a), Milanesi et al. (2017) e Zanadrea et al. (2018), citados no item 3.4.3. Como não há disponíveis gratuitamente para essa região imagens de satélite com resolução espacial inferior a 30 metros, foram realizados voos com o *drone* DJI Phantom 4 Pro pertencente ao Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental (LARHENA), localizado no Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba, sob a orientação de um técnico de topografia. Com isso, a área foi delimitada de acordo com a área do plano de voo do *drone*, mostrada na Figura 6. É mostrada na Figura 7 uma imagem da área de estudo registrada pelo *drone* depois de realizada a captura das imagens pelo plano de voo.

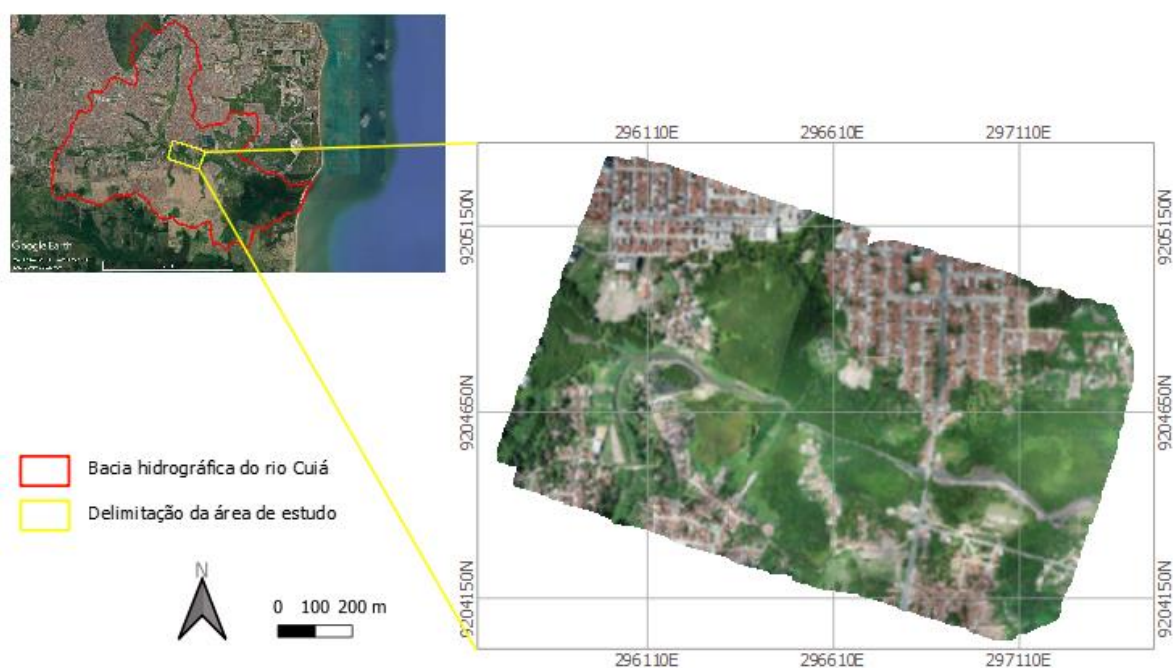


Figura 6: Delimitação da área de estudo na bacia hidrográfica do rio Cuiá. Fonte: autora.



Figura 7: Imagem aérea do *drone* da área de estudo. Fonte: autora.

A DFAARA, uma das estações meteorológicas que atendem o município de João Pessoa, registrou no dia 13 de fevereiro de 2019 uma precipitação de 71 mm (AESA, 2019). Foram registradas fotos na área de estudo da enchente que ocorreu nesse dia com alguns pontos de inundação nas laterais da via (Figura 8). No segundo semestre de 2018 foi realizada uma dragagem desse trecho para evitar as inundações constantes da pista e sazonalmente das residências mais próximas ao rio, como é mostrada na Figura 8d a operação da

retroescavadeira na margem à jusante da ponte com o nível do rio já elevado por conta das chuvas. Nota-se na Figura 8a que o nível do rio, mesmo após a dragagem, elevou-se consideravelmente, aproximando-se do terreno que estava sendo compactado para o assentamento de uma residência às margens do corpo hídrico. A Figura 8b mostra as margens da pista começando a inundar, à frente do terreno da Figura 8a. A Figura 8c retrata a inundação iniciando à jusante da ponte.



Figura 8: Registro da área de estudo no dia 13 de fevereiro de 2019 sobre a ponte do rio Cuiá, ligando a rua Francisco Porfírio Ribeiro, no Bairro de Mangabeira à rua Brasilino Alves da Nóbrega, no Bairro do Valentina: a) e b) representam as margens à montante da ponte e c) e d) representam as margens à jusante da ponte. Fonte: autora.

4.2 PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

Como o objetivo do estudo foi trabalhar com um MDE de alta resolução espacial, foram realizados dois voos com o *drone* DJI Phantom 4 Pro disponibilizado pelo LARHENA, como mencionado no item 4.1.1 Foi definida a resolução espacial do MDE de 0,26 m onde o *drone* voou a 250 m de altitude. Os voos foram realizados no dia 21 de fevereiro de 2019, mostrados na Figura 9.



Figura 9: Realização do plano de voo. a) Operação do *drone* no ponto de partida do voo 1; b) Modelo DJI Phantom 4 Pro retornando ao ponto de partida do voo 2. Fonte: autora.

Para o processamento das imagens, fez-se uso do programa *Agisoft Photoscan*, citado por Biggs (2019) como um dos *softwares* comumente utilizados para este fim. Após a criação de uma pasta com todas as imagens coletadas, estas foram alinhadas e projetadas por um sistema de coordenadas UTM, *datum* SIRGAS 2000 zona 25S. Finalizada essa etapa do processamento, realizou-se um ajuste interno automático de alinhamento das imagens em função das características do sensor (câmera).

Em seguida, optou-se por não processar ajustes de alinhamento externos (pontos de controle), considerando o que sugere Longhitano (2010) em relação à precisão relativa do processamento aerofotogramétrico:

A acurácia (precisão relativa) normalmente será relacionada ao GSD das imagens, sendo a planimétrica dada por 1,5 vezes o tamanho do GDS e a altimétrica três vezes

essa dimensão. Se, após determinado o tamanho do GDS, for constatado que a precisão global do projeto deverá ser superior a determinada por estes cálculos, então o uso de pontos de apoio em solo será necessário. (LONGHITANO, 2010).

Como o plano de voo relaciona um GDS (Ground Surface Distance) de 7,5 cm e uma acurácia esperada de 23 cm, se representou suficiente a análise proposta.

No próximo passo se realizou um descarte de cerca de 10% dos pontos alinhados com maiores erros de projeção e incerteza de construção com base no algoritmo do *Agisoft Photoscan*, melhorando o conjunto de dados alinhados pelas imagens. Daí a nuvem de pontos foi densificada e então gerado o MDS, com todas as elevações do terreno, vegetação e edificações. Ao processar as imagens, as ortofotos ficaram como a resolução de 6,5 cm e o MDS com precisão de 26 cm e a área de estudo foi de 1,42 km² após sobreposição das imagens.

Para chegar ao MDT, foi preciso realizar uma classificação do que era terreno, vegetação e edificações na nuvem densa de pontos, para então gerar o modelo digital do terreno excluindo as classificações acima do terreno. Mengue et al. (2017) citam que, para a aplicação do modelo HAND, o ideal é que seja utilizado o MDT em vez do MDS, por eliminar topo de prédios e vegetação arbórea densa que poderiam interferir no direcionamento do fluxo da água.

4.3 APLICAÇÃO DO MODELO HAND EM TRECHO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO CUIÁ

Para a geração do modelo HAND, foi utilizado o *software* livre *TerraView 4.2*, desenvolvido pelo INPE, onde o mesmo possui uma versão do HAND implementada ao módulo de extensão “*Hydrological Tools*”. O *software TerraView* também foi empregado em outros trabalhos como os de Mengue et al. (2016), Goerl et al. (2017a), Goerl et al. (2017b), Mengue et al. (2017), Milanesi et al. (2017) e Speckhann et al. (2017), os quais obtiveram bons resultados. Para este trabalho, optou-se pela escolha do MDT, ou seja, o modelo digital que considera apenas a elevação do terreno.

Percebeu-se uma limitação do *software* em termos do tamanho do arquivo – dimensões e resolução, que comprometeu o processamento dos mesmos. Por esse motivo, o MDT dos dois

voos foi processado separadamente para que houvesse maior agilidade na formulação dos dados. A seguir serão descritas as etapas para a obtenção do HAND.

4.3.1 Direção do fluxo de drenagem e correção do MDT

Nesse aspecto, a primeira etapa, com a consequente importação do MDT, foi determinar a direção do fluxo de drenagem e corrigir o modelo digital de terreno. A partir do MDT, que é uma matriz onde cada célula corresponde a um valor altimétrico, foi utilizado o método *Deterministic Eight-Neighbors* desenvolvido por O'Callaghan & Mark (1984), mais conhecido com D8, em que é possível determinar a direção que a água tomará baseado nos valores altimétricos das oito células vizinhas do ponto central, utilizando a regra da maior declividade para determinar a direção de fluxo ou simplesmente pelo princípio da força gravitacional. (MOMO et al., 2016).

O resultado dessa avaliação é uma matriz chamada LDD (*Local Drain Directions*), a direção do fluxo de drenagem, que graficamente são setas que direcionam o caminho percorrido pela água a partir da declividade do terreno. Entretanto, podem existir sumidouros no MDT, conhecidos como *sinks* ou *pits* em inglês, que são pontos na matriz onde todos os vizinhos possuem valores maiores que o seu, não representando, assim, a drenagem real. Isso pode ocorrer devido a irregularidades naturais do terreno ou mesmo ruídos dos dados criados no processamento topográfico da geração do MDT. Para garantir a propagação do fluxo em todas as células do MDT, foi realizada a correção dessas anomalias, obtendo um LDD e um MDT coerentes. (RENNÓ et al., 2008; MOMO et al., 2016; GOERL et al., 2017a).

Após definido um MDT corrigido, foi gerada a área total acumulada que precisa da matriz com valores numéricos (MDT) e da matriz de direção (LDD) para chegar à matriz resultante. Cada elemento da grade representa a soma de todos os pontos de menor valor e que foram direcionados a ele, representando o acúmulo de água em qualquer ponto ao longo do caminho do fluxo. Assim, essa função representa os elementos com maior acúmulo de pixels direcionados a ele. (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; NOBRE et al., 2011). A Figura 10 resume a etapa de correção do LDD e do MDT e da extração da drenagem.

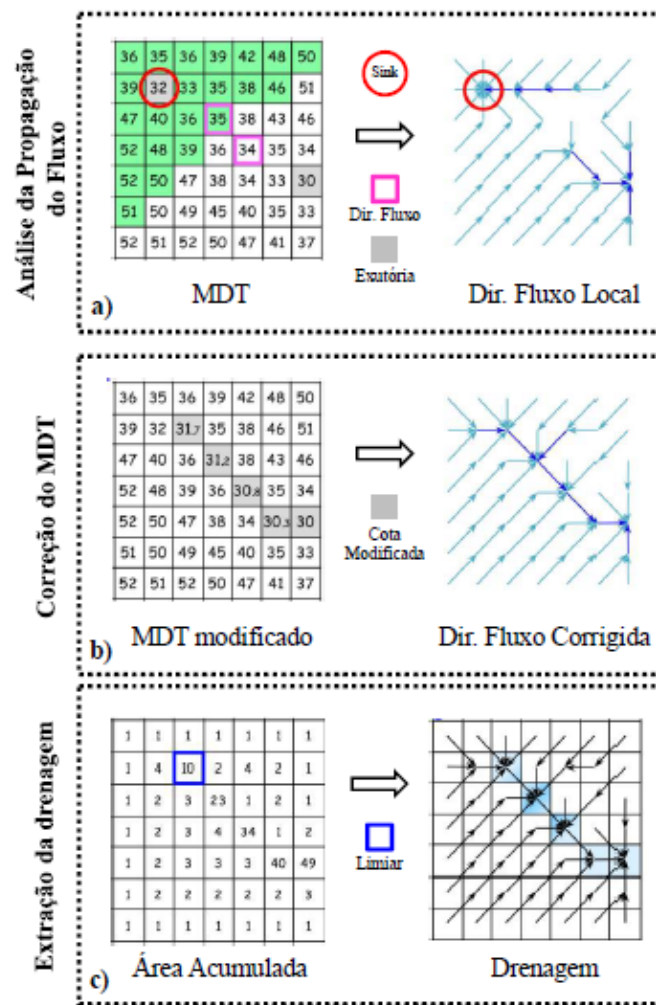


Figura 10: Etapas para a consistência hidrológica do MDT: a) consistência hidrológica; b) determinação da direção de fluxo; c) extração da rede de drenagem. Fonte: Nobre et al. (2011) adaptado por Goerl et al. (2017b).

4.3.2 Definição da rede de drenagem

Em continuidade, definiu-se a rede de drenagem determinada tendo como base a drenagem real da bacia hidrográfica do rio Cuiá. Partindo da área total acumulada, onde foram obtidos valores na matriz em que a água drenada mais se concentra, foi inserido um atributo correspondente ao limiar de drenagem, ou seja, um valor tal que indica que a drenagem principal iniciará em uma área de contribuição maior que o limiar mínimo definido. Dessa forma, quanto menor o limiar, menor será o número de células encontradas e, consequentemente, maior será a densidade de drenagem. (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; RENOÓ et al., 2008; NOBRE et al., 2011; MOMO et al., 2016).

Momo et al. (2016) explicam que se deve encontrar um limiar de drenagem que detalhe apenas os rios de maiores ordens, os quais proporcionam as inundações a partir da contribuição dos afluentes de ordem inferior. A escolha de limiares que detalham muitas redes de drenagem acarretará em uma superestimação da área inundada, por esse motivo é aconselhável um limiar próximo à realidade.

Para a definição do limiar, foi realizada uma sobreposição de um arquivo *shapefile* da drenagem da bacia hidrográfica do rio Cuiá utilizado no PMSB-JP. Assim, alterou-se o valor do limiar de drenagem de forma que encontrasse um que melhor se aproximasse da drenagem real.

Como se trabalhou com MDTs de alta resolução espacial, a quantidade de pixels foi muito elevada, necessitando, assim, de um limiar elevado. O valor de limiar escolhido apresentou redes de drenagem não verificadas na rede de drenagem de referência, e essa escolha foi feita pelo fato de ao aumentar o valor de iniciação da drenagem, trechos do rio principal deixavam de ser representados, o que não seria interessante para retratar a realidade.

4.3.3 Topologia do HAND

Desenvolvidos os passos anteriores, foi gerado o modelo HAND baseado na drenagem delimitada pelo limiar de drenagem, que fornece como saída um MDT normalizado com base na diferença entre a altitude do terreno e a rede de drenagem mais próxima, esta sendo a nova referência topográfica, com altitude igual à zero. (NOBRE et al., 2011; MOMO et al., 2016; GOERL et al., 2017a). Assim, para cada área (relativo ao voo 1 e voo 2) foi gerado o MDT, o LDD, a área acumulada, o limiar de drenagem e, por fim, o modelo HAND. A Figura 11 apresenta de forma simplificada o processamento do modelo HAND.

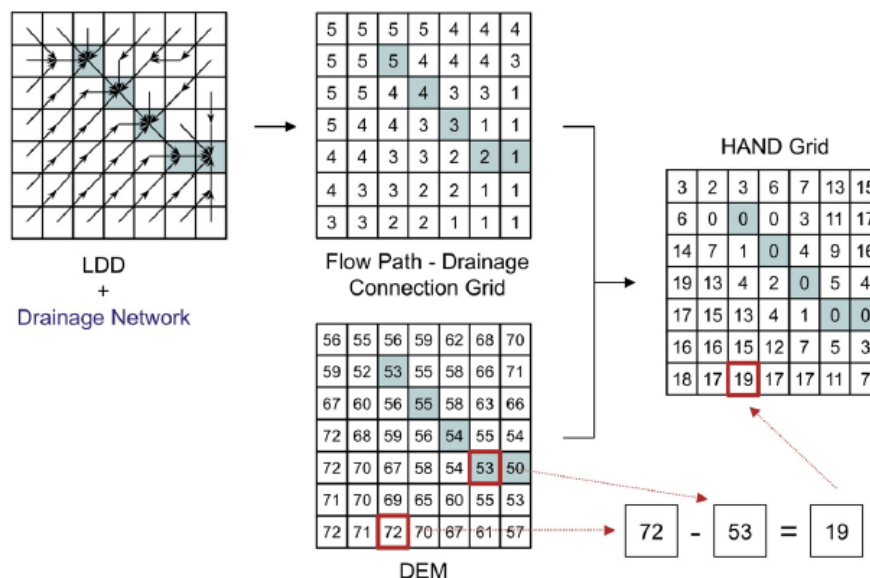


Figura 11: Processamento do modelo HAND. Fonte: Rennó et al. (2008).

A determinação das áreas inundadas foi estabelecida por meio de pontos coletados em campo por conversas informais com os moradores e marcações da água em suas residências. Dessa forma, estimou-se a elevação do nível do rio em uma grande inundação, delimitando, assim, as áreas de alta, média e baixa suscetibilidade a esses eventos.

A sobreposição da mancha de inundação nas ortofotos foi executada no *software* livre *Quantum Gis*, assim como, o fatiamento das áreas de suscetibilidade   inundação. Também foi realizada uma avaliação da área ocupada pela população em relação   área de Preservação Permanente (APP) em torno dos cursos d'água, que segundo o Art. 4  da Lei n  12.651/2012 (Código Florestal Brasileiro):

Art. 4  Considera-se área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:
I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os ef meros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de: (Inciso com redação dada pela Lei n  12.727, de 17/10/2012).
a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura. [...].(BRASIL, 2012).

Tendo como ponto de partida os *shapefiles* da delimitação da APP pertencentes à Prefeitura Municipal de João Pessoa, verificou-se que algumas residências estavam indevidamente inseridas nessa área, ou seja, não obedecendo   área mínima preservada para a dinâmica natural do corpo hídrico.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento dos modelos digitais gerou, primeiramente, o MDS (Figura 12) de cada voo e depois foram mesclados para as áreas em comum ficarem sobrepostas. Em seguida, foi realizada a classificação dos pontos do terreno para a eliminação da vegetação e de edificações, formando o MDT dos dois voos, apresentados na Figura 13 mesclados. A resolução espacial ao final do processamento do MDT e do MDS foi, em média, de 0,26 metros para os dois voos com o *drone*. A cota altimétrica da área de estudo para o MDT está no intervalo de 21,1 m a 68,9 m e de 23,4 m a 86,0 m para MDS, apresentando uma área total de 1,42 km², cerca de 3,54% da área da bacia hidrográfica do rio Cuiá.

A resolução espacial obtida foi fundamental para a qualidade dos resultados alcançados, como citado anteriormente por alguns autores que trabalharam com o modelo HAND a importância de um modelo digital de terreno com a precisão das informações do local de estudo.

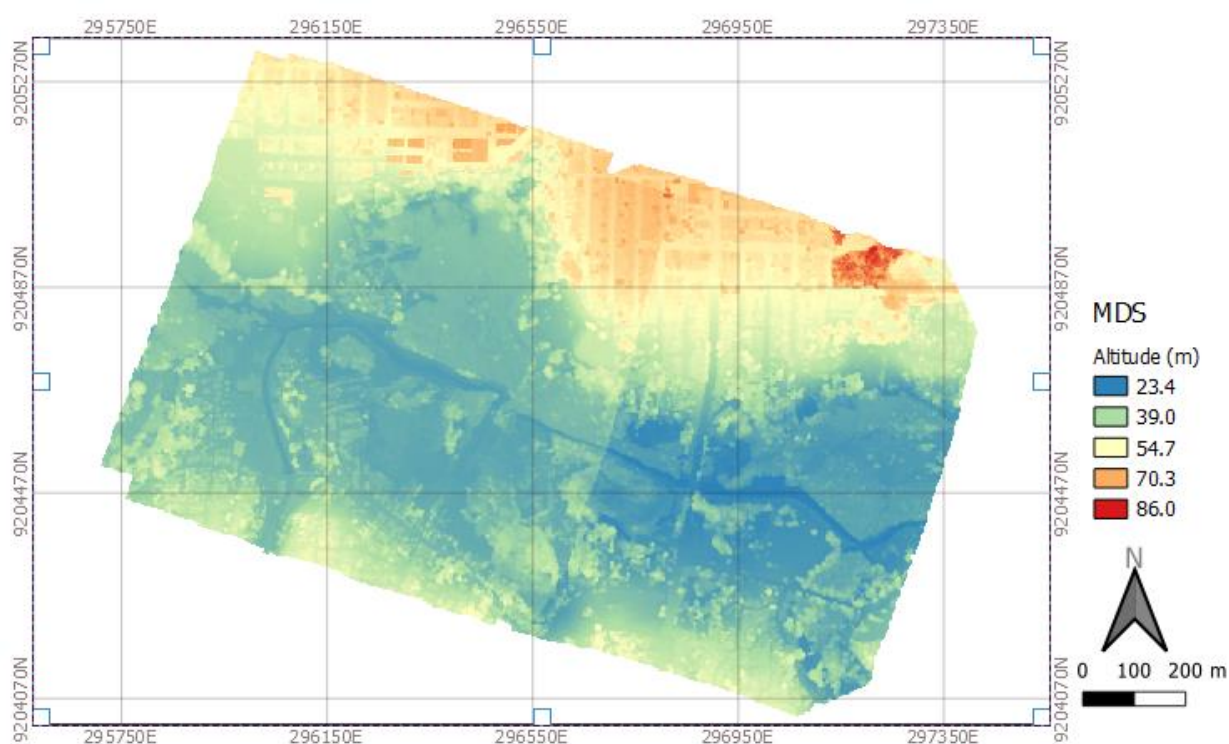


Figura 12: Modelo Digital de Superfície da área de estudo. Fonte: autora.

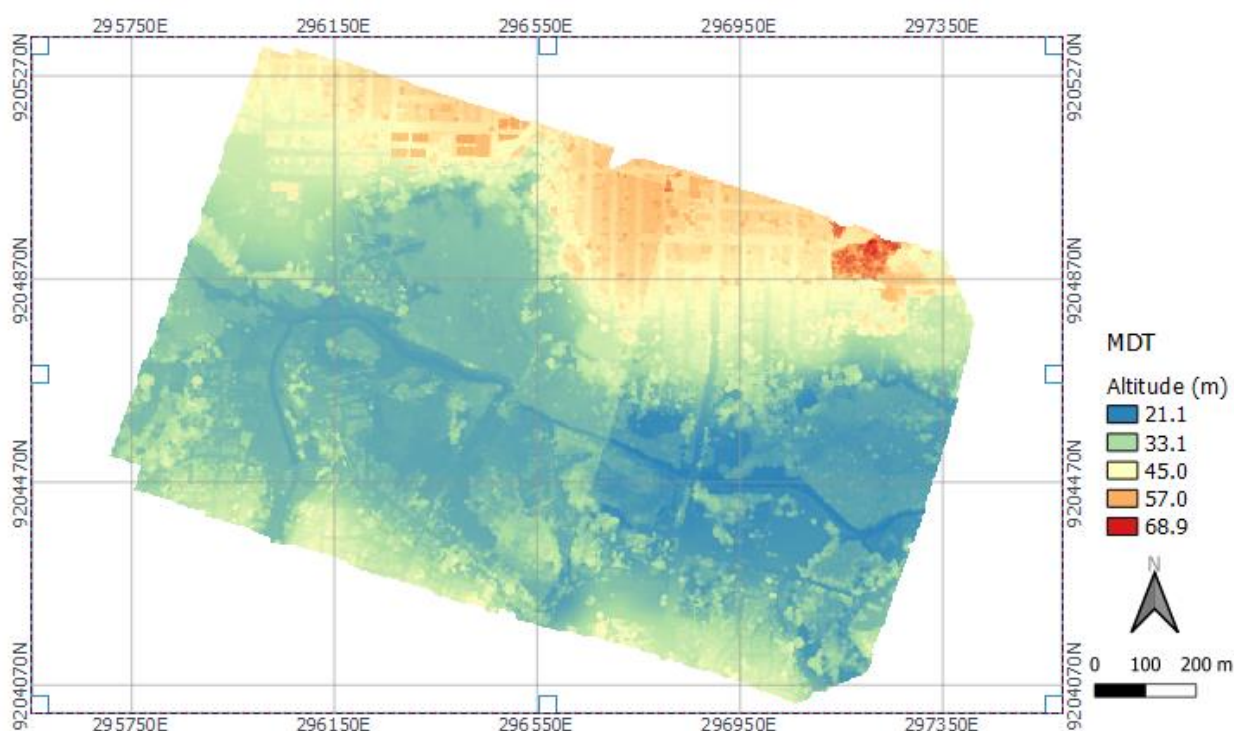


Figura 13: Modelo Digital de Elevação da área de estudo. Fonte: autora.

Optou-se pela escolha do MDT para a aplicação do HAND, assim como Mengue et al. (2017) e outros autores pelo fato de não haver interferência das edificações e da vegetação na percolação da água para a geração da rede de drenagem nos passos seguintes. A resolução espacial alcançada para este trabalho foi pioneira, pois a mais alta resolução encontrada para o estudo com o modelo HAND foram modelos digitais de elevação com um metro de resolução espacial, citadas no item 3.4.3.

Como passo seguinte, foi realizado o procedimento para a geração do LDD e da área acumulada descrito no item 4.3.1 e, em seguida, encontrou-se o limiar de drenagem da área de acordo como o item 4.3.2. Chegou-se, por fim, ao limiar de 500.000, ou seja, foi definido que a drenagem só iniciaria acima da contribuição de 500.000 pixels, ou um limiar de 0,034 km², seguindo o mesmo princípio da quantidade de pixels contribuintes para iniciar o canal, porém agora a drenagem irá iniciar a partir da contribuição de uma área de 0,034 km², como mostrado na Figura 14. Como a drenagem é representada por pixels (pontos), foi feito um recorte da mesma para uma melhor visualização.

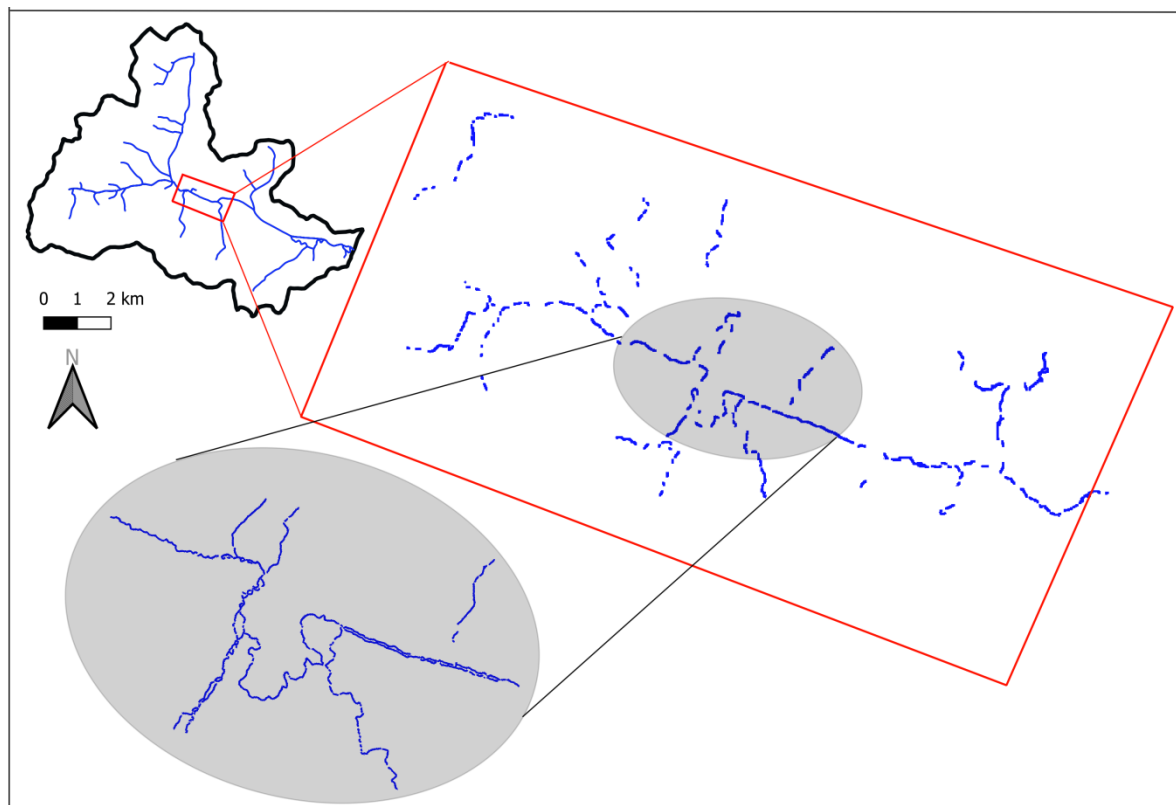


Figura 14: Mapa da drenagem do rio Cuiá e do limiar escolhido.

Assim, foi tomado como referência os trabalhos de Goerl et al. (2017b) e Zanandrea et al. (2018) onde utilizaram pontos de inundação coletados em campo pelos os mesmos ou por meio de informações da Defesa Civil de suas respectivas áreas de estudo. Neste trabalho, foram realizadas duas visitas ao local com a Defesa Civil municipal nos dias 15 de janeiro e 11 de abril de 2019 para coletar alguns pontos de inundação em eventos anteriores, encontrando três pontos mostrados na Figura 15. Esses pontos de inundação ocorreram antes da dragagem do rio realizadas no segundo semestre de 2018. Com essa intervenção, o nível do rio desceu cerca de 1 m, segundo a Defesa Civil. Portanto, a maior elevação encontrada a partir do nível do rio foi de 3,0 metros, referente à Figura 15b.

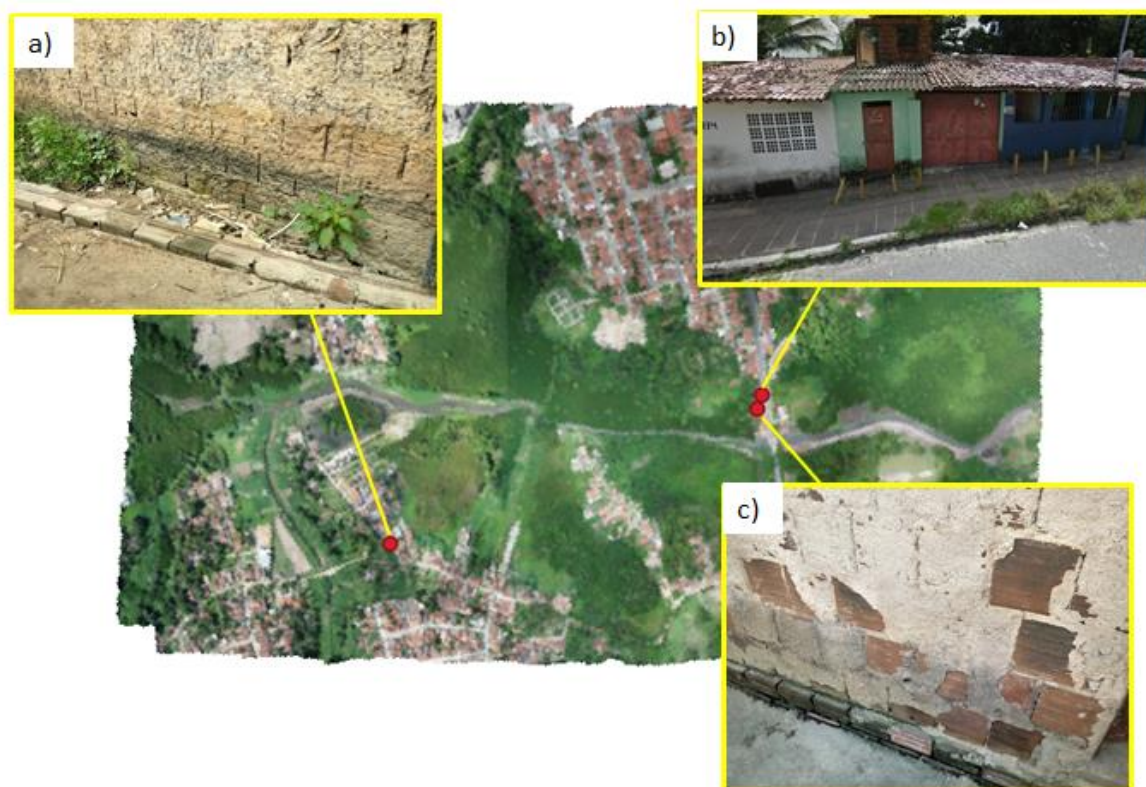


Figura 15: Pontos de inundação na área de estudo: a) marca d'água na parede externa de uma residência em uma comunidade próxima ao rio (11/04/19); b) marca da água na parede externa de uma residência próxima à ponte; c) marca da água na parede no interior de uma residência próxima à ponte (15/01/19). Fonte: a) e b) registradas pela autora; c) imagem do Google Street View.

Dessa forma, foram feitas duas simulações de inundação: uma simulação com a elevação do rio antes da dragagem e uma simulação da elevação após a dragagem. Na primeira situação, o nível do rio estava 1 m acima do que está hoje, verificando-se que este deveria subir cerca de 2 m para alcançar os pontos de inundação dispostos na área analisada. Como o intuito foi avaliar as áreas inundadas, simulou-se uma elevação do rio de mais 1 m, totalizando 3 m de elevação. Na segunda simulação que mostra a situação atual do nível estar 1 m abaixo do anterior, elevou-se o nível do rio em 2 m e compararam-se as duas situações.

5.1 Primeira simulação

Na primeira simulação, que foi a forma encontrada de estimar as inundações ocorridas antes da dragagem, verificou-se que os pontos de inundação estavam inseridos na área de baixa suscetibilidade à inundação, ou seja, em épocas do ano com precipitações de grande intensidade as residências poderiam ser atingidas pelas inundações no rio Cuiá (Figura 16). A

inundação foi subdividida em três casses: alta suscetibilidade à inundação (0 – 1,0 m); média suscetibilidade (1,1 – 2,0 m); e baixa suscetibilidade (2,1 – 3,0 m).

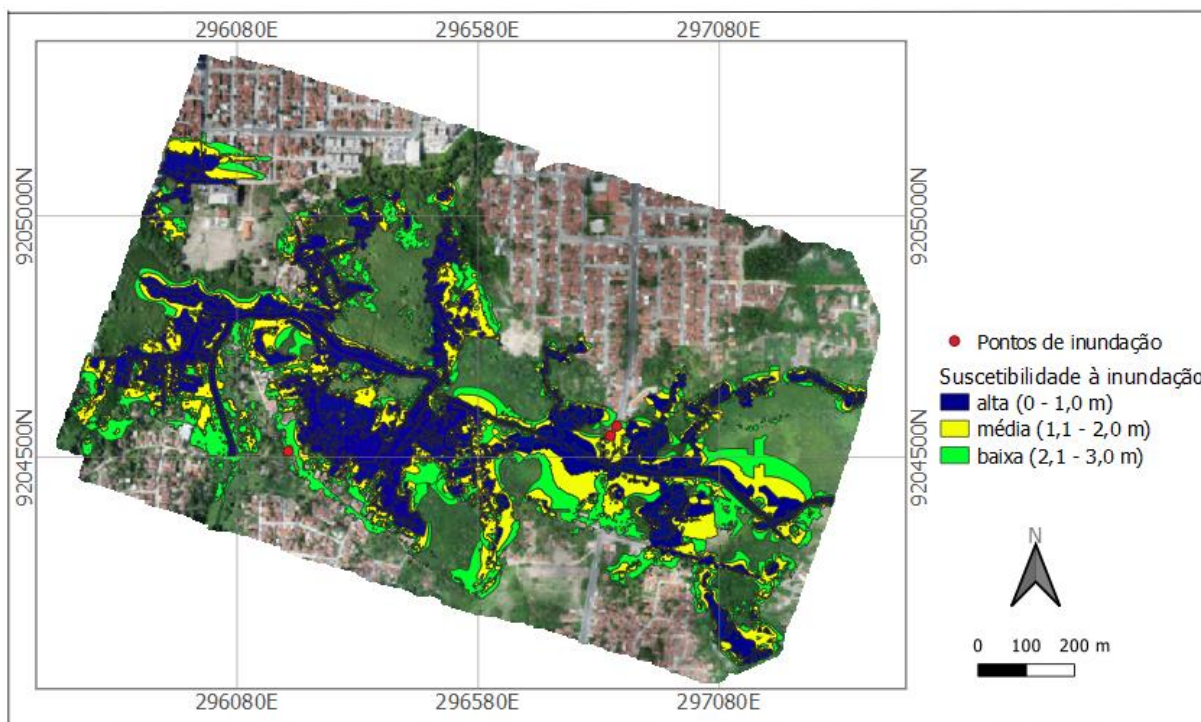


Figura 16: Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo antes da dragagem do rio Cuiá utilizando o modelo HAND. Fonte: autora.

Há áreas na Figura 16 que mostram ruas como canais; isso ocorreu durante a escolha do limiar de drenagem, pois, ao elevar o valor limiar para que as ruas deixassem de ser consideradas canais, alguns trechos do rio principal ficavam descontínuos, ou seja, deixaram de ser representados. Isso aconteceu pelo fato de algumas áreas próximas ao rio estarem no mesmo nível do canal principal e contarem com uma elevação entre elas nas margens do rio. Essas elevações do solo são decorrentes do assentamento para as retroescavadeiras realizarem a dragagem do rio, percorrendo sua margem e fazendo a função de diques. Devido ao detalhamento do MDT que revela todos os locais capazes de acumular água, algumas regiões da Figura 16 apresentam pontos de inundação distantes da área foco, que seria próximo ao leito do rio. As Figuras 17 e 18 mostram a área de estudo dividida em dois voos, para melhor visualizar as áreas inundáveis.

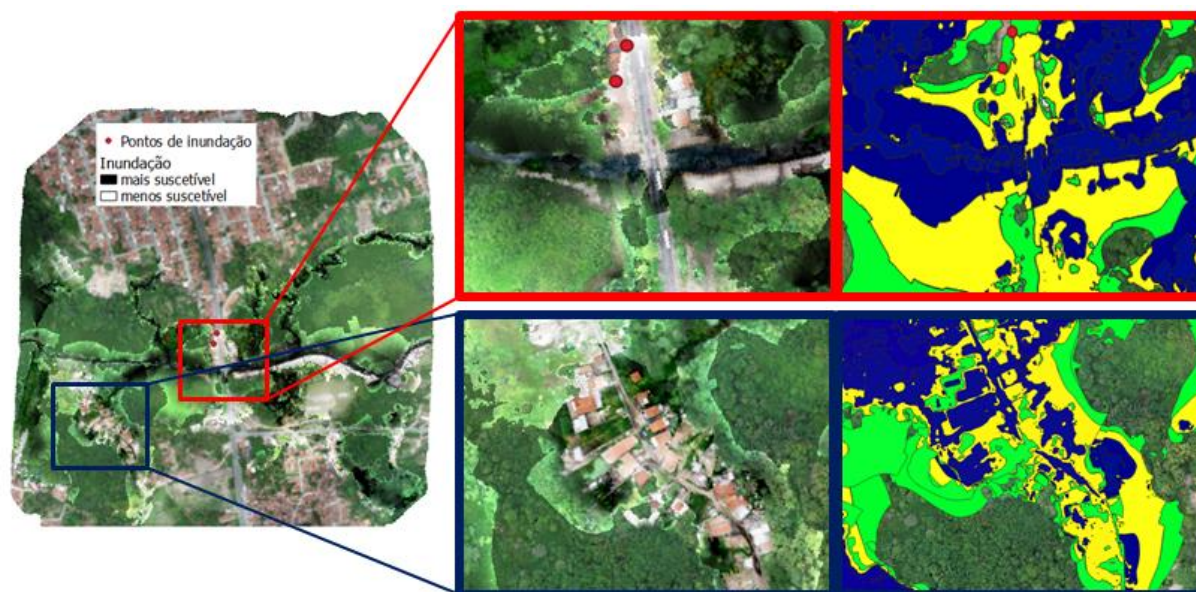


Figura 17: Mancha de inundação do modelo HAND com elevação de 3 m sobreposta à região do voo 1 da área de estudo. Fonte: autora.

Na Figura 17 foi feita uma sobreposição da área inundada sobre a área de estudo para uma melhor visualização das residências afetadas pelas cheias. Nota-se que a região destacada em azul é afetada pelas inundações desde a elevação mais baixa (em preto); isso ocorre devido o nível do solo nessa área ser o mesmo nível do rio, sendo esse local interpretado pelo modelo como um canal de drenagem. Na situação real, essa região é efetivamente afetada, pois as águas provenientes das chuvas não têm por onde escoar e se acumulam nessa área, até o ponto em que a elevação suba e encontre um caminho por onde escoar. A área destacada em vermelho é o mesmo ponto encontrado pelo PMSB-JP (item 4.1) como problemático em termos de inundação constante da pista; antes da dragagem, as casas dessa região também eram invadidas pela água em grandes cheias, como registrada a marca do nível d'água na Figura 15c (representada pelo ponto de inundação mais próximo ao rio na Figura 17) ou servindo como marcação do ponto máximo de inundação como na Figura 15b (ponto de inundação mais distante do rio na Figura 17).

A Figura 18 faz um recorte de duas áreas afetadas pelas inundações. A região destacada em azul mostra uma local próximo ao rio que passa uma parte do ano inundado, uma espécie de lago que possui uma grande quantidade de algas em sua superfície e que é separada por uma elevação do terreno feita para o deslocamento da retroescavadeira. Segundo os moradores, quando há elevada precipitação, a água se acumula e não tem por onde escoar, que fez com

que com eles cavassem um caminho ao rio para permitir o escoamento da água do lago ao rio. No recorte em vermelho está localizado o terceiro ponto de inundação coletado em campo, localizado na parte de fora da residência, mostrado na Figura 15a; não se teve acesso ao morador dessa casa, logo não foi possível confirmar que esta foi afetada em seu interior como mostrado na Figura 17. Ainda nesta figura é verificado que outras residências são afetadas pelas inundações de acordo com a simulação do modelo HAND.

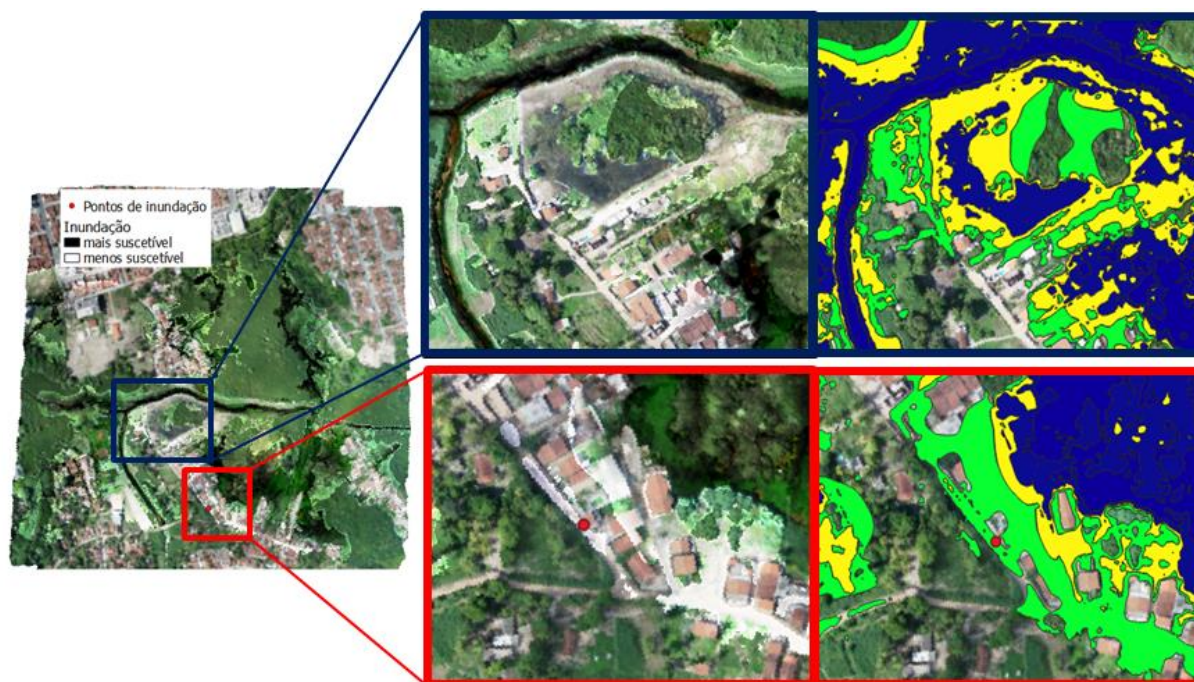


Figura 18: Mancha de inundação do modelo HAND com elevação de 2 m sobreposta à região do voo 2 da área de estudo. Fonte: autora.

5.2 Segunda simulação

A segunda simulação foi realizada considerando que o rio poderia elevar-se até 2 m a partir de seu nível normal. Como foi realizada uma dragagem nesse trecho fazendo com que o nível do rio descesse cerca de 1 m, é esperado que as cheias não inundem mais a região, como exposto pelos moradores. Para o mesmo limiar de drenagem, foi simulado o HAND com uma elevação de 2 m e se manteve o fatiamento das áreas suscetíveis à inundação a cada metro, dividindo-se entre alta suscetibilidade (0 – 1,0 m) e baixa suscetibilidade (1,1 – 2 m), como observado na Figura 19.

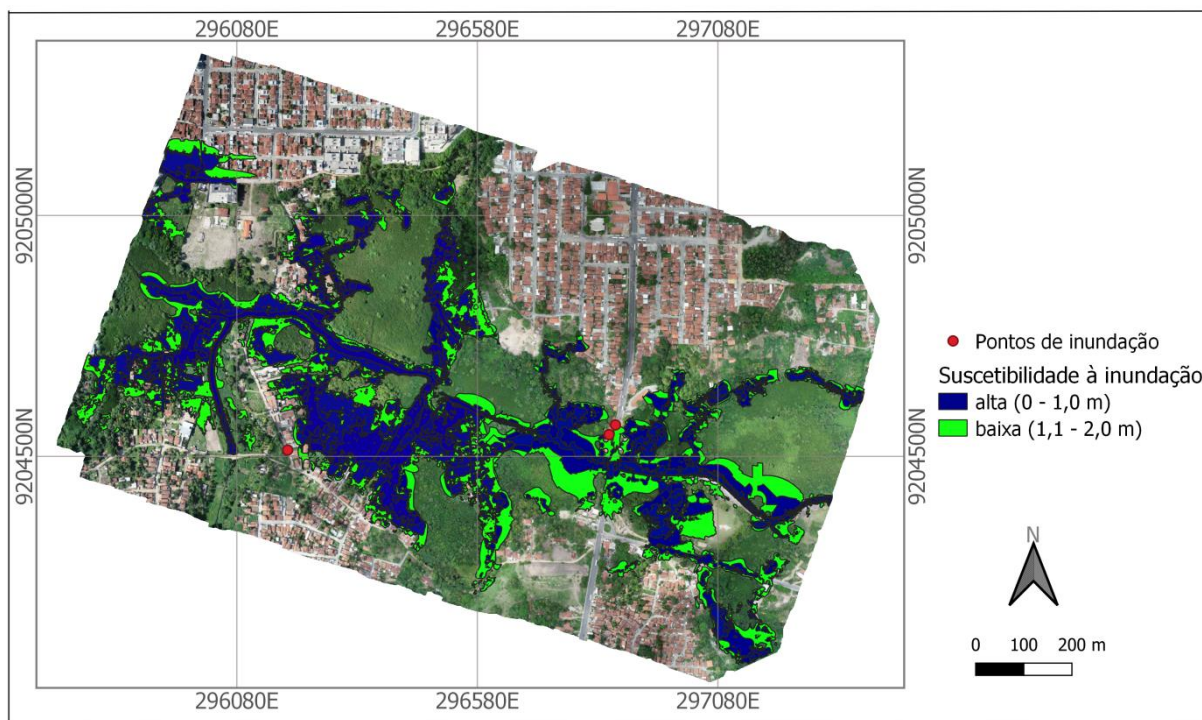


Figura 19: Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo depois da dragagem do rio Cuiá utilizando o modelo HAND. Fonte: autora.

Verificou-se que, após a dragagem do rio, os pontos identificados como inundáveis não foram mais atingidos pelos cheias. Portanto, pode-se afirmar que a dragagem realizada no rio contribuiu positivamente para a redução das inundações. De acordo com Mendes & Lima (2007), intervenções antrópicas, como dragagens de rios para retirada de grandes volumes de sedimentos, são operações que não atuam na origem do problema nas vertentes da bacia e que frequentemente necessitam ser realizadas. Essa prática faz com que a população que mora irregularmente em áreas suscetíveis a inundação se acomodem por não sofrerem mais com esses eventos e, portanto, não queiram trocar suas residências por outras mais seguras.

Outro fator a ser considerado é a população ribeirinha corriqueiramente localizar-se na planície de inundação, delimitada pela APP. Muitas vezes, essa planície ultrapassa o limite de 30 metros para cada margem de rios com até 10 metros de largura, estabelecido pela Lei nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012), pois a inundação natural do rio depende de sua dinâmica hídrica, se o mesmo está assoreado ou se já não possui cobertura vegetal em suas margens, entre outros fatores. Como já mencionado, foi feito uso do *shapefile* da Prefeitura Municipal de João Pessoa para a delimitação da APP e notou-se que, em alguns locais, as residências

ultrapassam esse limite e consequentemente são afetadas pelas inundações ribeirinhas, como mostrado na Figura 20.

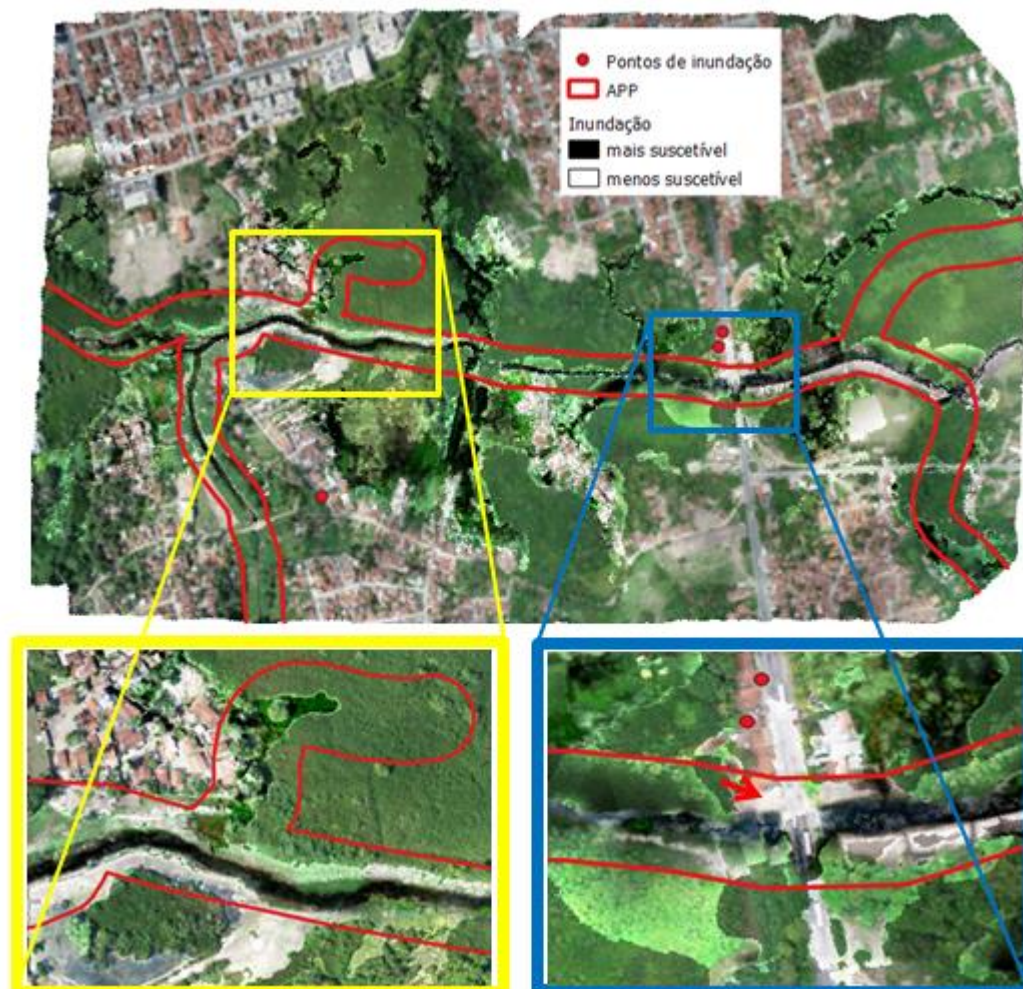


Figura 20: Sobreposição da mancha de inundação gerada pelo HAND de até 2 m de elevação e delimitação da APP às margens do rio. Fonte: autora.

Percebe-se que o terreno preparado para a construção de uma casa situada à beira do rio Cuiá, apresentado na Figura 8a, encontra-se no interior da APP, como mostra a Figura 20 pela região delimitada em azul e indicada pela seta vermelha. Segundo a Defesa Civil do município de João Pessoa, houve uma intervenção do órgão no terreno e a obra foi interdita, resguardando o local para a inundação do rio em eventos de precipitação extrema. Na região destacada em amarelo, três residências estão inseridas indevidamente na delimitação da APP.

A educação ambiental nesta região é muito importante para que a população seja conscientizada acerca da deposição de resíduos sólidos nas margens do rio, do lançamento de esgoto doméstico no corpo hídrico, do desmatamento da vegetação ao seu entorno, tendo em

vista que esta é imprescindível para que o solo exposto não seja transportado para o leito do rio em precipitações de grande magnitude, e assim evite o seu assoreamento.

A fiscalização da área pela Defesa Civil do município e pela própria população que reside entorno ao rio é necessária para evitar o assentamento de novas residências próximas ao rio, principalmente no interior da APP. A instalação de novos domicílios fará com o que o solo seja compactado e que a água precipitada não mais infiltre, aumentando o escoamento superficial em direção ao leito menor do rio, o que sobrecarregará sua capacidade de transportar as águas pluviais sem que haja o extravasamento para o leito maior, afetando as demais residências.

Segundo informações da Defesa Civil, antes da dragagem, alguns moradores sofriam com inundações, entretanto não registravam ocorrência pois não queriam ser transferidos para outros locais. Há um conjunto habitacional próximo à área de estudo, porém os residentes desta recusam-se a deixar suas moradias, continuando a viver em constante situação de risco, pois se a dragagem do rio não for realizada frequentemente, os problemas de inundação voltaram a acontecer.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os transtornos causados pelas inundações são recorrentes em todo país, seja por obstrução de vias ou pela invasão das águas nas residências que são mais vulneráveis a esse risco de desastre. A situação observada no trecho do rio Cuiá, em João Pessoa, revela que a comunidade que vive em torno do curso d'água necessita de educação ambiental para conviver com as cheias e possíveis inundações do rio. Cabe também ao poder público tomar providências para que a população conviva harmonicamente com a dinâmica do curso hídrico a fim de evitar possíveis desastres.

O modelo HAND mostrou-se eficiente em simular as manchas de inundação na região de estudo. Os pontos ditos como inundáveis cumpriram seu papel nas duas situações impostas para o modelo. Na primeira simulação, antes da dragagem do rio, levou-se em conta o rebaixamento do nível do canal de drenagem em 1 m, gerando uma mancha que cobriu os pontos de inundação históricos, assim como apresentou o acúmulo de água em precipitações intensas em algumas comunidades próximas ao rio. Na segunda simulação, referente à situação do rio após a sua dragagem com o nível d'água 1 m abaixo em relação ao anterior no ponto próximo à ponte, os pontos de inundação não foram atingidos pelas manchas, bem como foi relatado ao conversar com alguns moradores.

Isso mostra que a dragagem para a retirada de sedimentos realizada no rio foi eficiente para o controle da inundação. No entanto, essa é considerada uma prática agressiva pois, ao longo de tempo, o leito natural do rio é modificado, o que poderá transferir o problema de inundação no local de estudo para um trecho a jusante desse ponto, afetando outros habitantes.

Desse modo, o estudo contribuiu de forma significativa para entender a dinâmica de inundação em um trecho do rio Cuiá utilizando apenas dados do próprio terreno, sendo considerado eficiente por apresentar resultados consistentes e que podem ser obtidos a partir de um processamento relativamente rápido. Esses dados certamente servirão para auxiliar a Defesa Civil de João Pessoa em locais com potencial risco à inundação.

Como sugestão a trabalhos futuros, o ideal seria ampliar a área de estudo para toda a bacia hidrográfica do rio Cuiá para que se tenha uma visão geral da dinâmica da água na bacia e, assim, contribua na detecção de outros pontos inundáveis.

7 REFERÊNCIAS

AESA – Agência Executiva de Águas da Paraíba. Meteorologia – Chuvas – Gráfico. Precipitações em João Pessoa no mês de fevereiro/2019. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas-grafico/?id_municipio=95&date_chart=2019-02-28&period=month. Acesso em: 29 mar 2019.

ANTUNES, A. F. B.; HOLLATZ, R. C. V. Cadastro Técnico Multifinalitário de baixo custo utilizando VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado). **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, João Pessoa, INPE, 2015.

BIGGS, H. Drones in Hydraulics. **Hydrolink**. n. 1: p. 4-6, 2019. ISSN 1388-3445.

BRASIL. **LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil. **Arquivo digital Sistema Integrado de Informações sobre Desastres – S2ID. 2018**. Disponível em: <https://s2id-search.labtrans.ufsc.br/>. Acesso em: 19 abr 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166- 67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. BRASÍLIA, 2012.

BRAZ, A. M.; BORGES, J. P. S.; BERNARDES. D. C. S.; TEREZAN, L. H. Análise da aplicação de VANT na atualização de cadastro florestal com uso de pontos de controle **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 2751 – 2758, INPE 2015.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for earth resources assessment**. Oxford: Clarenton Press, 1986.

CÂNDIDO, A. K. A. A. et al. Modelo Digital de Superfície gerado a partir de imagens de VANT. **Anais. 5º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Campo Grande, p. 296 -303, 2014.

CARDONA, O. D. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo. In: MASKREY, Andrew (Ed.). **Los desastres no son naturales**. Colombia: LA RED; ITDG, p. 51-74, 1993.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

CASTRO, A.L.C.; CALHEIROS, L. B. **Manual de medicina de desastres**. Ministério da Integração Nacional. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Brasília: MI, 2007.

CASTRO, V. L. S.; LIMA, D. M. ; COSTA, A. H. A.; PAZ, A. R. Processamento de modelo digital de elevação para estimativa do tempo de percurso do escoamento superficial. **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa; p. 6305-6312, INPE, 2015.

CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, n. 1, p. 126-141, 2006.

CHAVES, M. A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a Bacia Amazônica**. Tese (doutorado em Ciência Florestal). Viçosa: UFV, 2002. 115p.

CRUZ, C. B. M. Avaliação da exatidão planialtimétrica dos modelos digitais de superfície (MDS) e do terreno (MDT) obtidos através do LIDAR. **Anais. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, INPE, 2011.

DOD – SECRETARY OF DEFENSE. **Unmanned Systems Integrated Roadmap**. FY2011-2036. 2014.

DOD – SECRETARY OF DEFENSE. **Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Roadmap**. Washington, 2003. 195p.

EGG, G. C.; GRIPP JR, J.; MEDEIROS, N. G. Geração de modelos digitais de superfície compostos utilizando imagens do sensor prism/alos **Revista Brasileira de Cartografia**. n. 65/5, p. 951-966, 2013. ISSN: 1808-0936.

FARR, T. G., et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Rev. Geophys.**, n. 45, 2007. DOI:10.1029/200. 5RG000183.

FILGUEIRA, H. J. A.; DO NASCIMENTO, A.V.; CLEMENTE, J.C.; TARGINO, R. A. Asentamientos informales en áreas de riesgo: un caso de estudio en João Pessoa, Paraíba, Brasil. **Cuadernos de Vivienda y Urbanismo**, v. 2, n. 3, 2013.

GAROFALO, D. F. T.; LIESENBERG, V. Análise comparativa da informação altimétrica presente nos modelos digitais de elevação ASTER GDEM 1 e 2, SRTM e TOPODATA. **Anais. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa, p. 2867-2875, INPE, 2015.

GOERL, R. F.; CHAFFE, P. L. B.; SPECKHANN, G. A. et al. O modelo HAND como ferramenta de mapeamento de áreas propensas a inundar. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Florianópolis, p.1-8, 2017a.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho e diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 69, v. 1, p. 61-69, 2017b. ISSN: 1808-0936.

GOERL, R; KOBİYAMA, M. Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. **Ambiência (Online)**, v. 9, n. 1, p.145-172, 2013. ISSN: 1808-0251.

HONG, H. et al. Landslide susceptibility assessment in the Anfu County, China: comparing different statistical and probabilistic models considering the new topo-hydrological factor (HAND). **Earth Science Informatics**, n. 11, p.605-622, 2018.

KLEMAS, V. V. Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. **Journal of Coastal Research**. v. 31, Issue 5: p.1260-1267, 2015.

KOBİYAMA, M. et al. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109p.

LONGHITANO, G. A. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas**. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 163 p.

LUCENA, A. P.; PIRES, A. L.; FILGUEIRA, H. J. A.. O uso do IVDN no estudo da degradação ambiental da bacia hidrográfica do Rio Gramame, Paraíba. **Geociências**, v. 36, n. 4, p.755-769, 2017.

LUIZ, S. SANTOS. A. R. S. BRENNER, T. L. Geração de Modelo Digital de Elevação a partir de Imagens Reference Stereo do Satélite IKONOS. Anais. XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, INPE, p. 581-587, 2007.

MACKLIN, M.G.; LEWIN, J. The rivers of civilization. **Quaternary Science Reviews**, n.114, p. 228-244, 2015.

MCGRATH, H. et al. A comparison of simplified conceptual models for rapid web-based flood inundation mapping. **Nat Hazards**. v. 93, p.905-920, 2018.

MENDES, C. A. B.; LIMA, W. P. Análise de impactos ambientais de florestas plantadas, no contexto de bacias hidrográficas: princípios norteadores. **Anais**. I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, Taubaté, IPABHI, p. 263-270, 2007.

MENGUE, V. P., SCOTTÁ, F. C., SILVA, T. S.; FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais susceptíveis à inundação no Rio Uruguai **Pesquisas em Geociências**, n.43, v.1, p. 41-53, 2016.

MENGUE, V.; GUERRA, R.; MONTEIRO, D.; MORAES, M.; VOGT, H. Análise da expansão urbana em áreas suscetíveis à inundação utilizando o modelo HAND: o caso da

Região Metropolitana de Porto Alegre, Brasil. **GOT - Revista de Geografia e Ordenamento do Território**, n. 12, 2017.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L.; LAHM, R. A. Utilização do Modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**. n.69, v.4; 2017. ISSN: 1808-0936.

MOMO, M. R.; PINHEIRO, A.; SEVERO, D. L.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, A. D. Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n.1, p. 200-208, 2016.

MOURA, L. H. M. **Entendendo as vulnerabilidades para a percepção do risco a desastre: um estudo de caso na Comunidade Santa Clara, João Pessoa, Paraíba**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. 56 p.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNO, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. **Journal Hydrology**. v. 404, n. 1-2, p.13–29, 2011. DOI: 10.1016.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, C. A. HAND contour: a new proxy predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**. n. 30, p. 320–333, 2016. DOI: 10.1002.

O'CALLAGHAN, J.F., MARK, D.M., The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**. n. 28, p.323–344, 1984.

OBT – Observação da Terra. **Software desenvolvido pelo INPE simula a trajetória da lama no colapso da Barragem em Brumadinho/MG**. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/OBT/noticias/software-desenvolvido-pelo-inpe-simula-a-trajetoria-da-lama-no-colapso-da-barragem-em-brumadinho-mg?fbclid=IwAR30YYDczCzhqNPSHwPXJ3IXmUYR2PZPX1L4HAO-R4xMMWIr2TZkwpCG2Yo>. Acesso em: 09 mar 2019.

PACHECO, A. P.; CENTENO, J. A. S.; ASSUNÇÃO, M. G. T.; BOTELHO, M. F. Classificação de pontos LIDAR para a geração do MDT Bol. **Ciênc. Geod. (Online)** v.17, n. 3, 2011. ISSN 1982-2170.

PARAÍBA. Prefeitura Municipal de João Pessoa. **Plano Municipal de Saneamento Básico de João Pessoa – PMSB-JP**. Versão Preliminar. Semanário Oficial Nº 1509, 2015. 458 p. (Edição Especial).

PINHEIRO, A. Enchente e inundação. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007. 192 p.

REIS, A. L. Q. **Índice de Sustentabilidade aplicado à bacia do rio Cuiá – João Pessoa (PB)**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA) Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010. 137 p.

RENNÓ, C.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment [online]**. Vol. 112, p.3469-3481, 2008. ISSN: 0034-425.

RODRIGUES, D. A.; GALLARDO, A. L. C. F. Vantagens da aerofotogrametria por drone na obtenção de dados topográficos em estudos de lixões e aterros sanitários. **Anais**. VII SINGEP – Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. São Paulo, 2018.

RODRIGUES, G. O.; NOBRE, A. D.; SILVEIRA, A. C. CUARTAS, L. A. Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (*Height Above the Nearest Drainage*) – estudo de caso em Manaus/AM. **Anais**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, INPE, p.5769-5776, 2011.

SILVA, L. P. **Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007. 114p.

SPECKHANN, G. A.; CHAFFE, P. L. B.; GOERL, R. F. ABREU, J. J.; FLORES, J. A. A. Flood hazard mapping in Southern Brazil: a combination of flow frequency analysis and the HAND model. **Hydrological Sciences Journal**, 2017. DOI:10.1080/02626667.2017.1409896

SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PARANÁ). **Manual de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba**. Curitiba. 2000.

TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. **Journal of Hydrology**, v. 139, p. 263 – 293, 1992.

TSCHIEDEL, A. F.; MONTE, B. E. O.; MEDEIROS, M. S.; MIERES, L. S.; FAN, F. M.. Construção de um modelo digital de superfície de uma voçoroca a partir do uso de drone. **XII Brazilian Meeting of Sediment Engineering. I Particles in the Americas**. Vitória, 2018.

TUCCI, C. E. M. Água no meio urbano. In: **Livro da Água Doce**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisa Hidráulica - UFGRS, 1997.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 1, p. 5 – 27, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - Wolrd Bank – Unesco. 2005. 270 p.

UNISDR – United Nations International Strategy for Disasters Reduction. **Como Construir Cidades Mais Resilientes: Um Guia para Gestores Públicos Locais**. Genebra: UNISDR, 2012.

UNISDR. **2018: Extreme weather events affected 60m people**. Publicado em 24 de janeiro de 2019. Disponível em: <https://www.unisdr.org/archive/63267>. Acesso em: 18 abr 2019.

VARGAS, J.E. **Políticas públicas para la reducción de la vulnerabilidad frente a los desastres naturales y socio-naturales**. Santiago de Chile: Naciones Unidas, División de Medio Ambiente y Asentamientos Humanos, CEPAL – Serie Medio ambiente e desarrollo, n. 50, 2002.

ZAHED FILHO, K.; MARTINS, J. R. S.; PORTO, M. F. A. **Fascículo 3: Inundações Urbanas**. Água em Ambientes Urbanos. Coleção Águas Urbanas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 21p.

ZANANDREA, F.; VANELLI, F. M.; TAVARES, T. G. A.; GOLDENFUM, J. A. Delimitação da área potencialmente inundada pela cheia histórica de 1974 em Tubarão, SC. **I Encontro Nacional de Desastres**, Porto Alegre, 2018.

ZUFFO, A. C. Drenagem urbana. In: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade Ambiental**. Brasília: MMA, 2007. 192 p.