

AVALIAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO NA GERAÇÃO DE MAPAS DE SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÃO A PARTIR DO MODELO HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND)

EVALUATION OF DIFFERENT DIGITAL ELEVATION MODELS IN THE GENERATION OF FLOOD SUSCEPTIBILITY MAPS FROM THE HEIGHT ABOVE THE NEAREST DRAINAGE (HAND) MODEL

Cinthia Maria de ABREU CLAUDINO¹, Shayelli Laiany Mareco ABRANTES¹, Ana Alice Rodrigues Dantas ALMEIDA¹, Thiago de Sá SENA², Cinthya Santos da SILVA¹, Hamilcar José Almeida FILGUEIRA¹

¹Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Jardim Universitário, S/N - Campus I - Castelo Branco, João Pessoa - PB. E-mail: cinthiamariaac@gmail.com; shayabrantess@gmail.com; anaalicerd@gmail.com; santosscinthya@gmail.com; hfilgueira@gmail.com

²Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Rua Aprígio Veloso, 882, Bloco CT, LGA, Bairro Universitário, Campina Grande - PB. E-mail: enghiangosena@gmail.com

Introdução
Materiais e métodos
Área de estudos e dados utilizados
Modelo digital de elevação
Aplicação do Modelo HAND para a estimativa de áreas passíveis de inundação
Avaliação das informações geradas
Determinação de áreas suscetíveis a inundação
Mapa de Uso e Ocupação
Resultados e discussões
Considerações finais
Referências

RESUMO - O modelo HAND é uma ferramenta amplamente utilizada para indicar áreas suscetíveis a inundações. Entretanto, a escolha da fonte e resolução do MDE influencia no resultado. Assim, buscou-se avaliar o desempenho de diferentes MDEs na geração de mapas de susceptibilidade a inundação utilizando o HAND. Utilizando dados do SRTM (90 e 30m) e o ALOS PALSAR (12.5m). Tendo como região de estudo a cidade de São João do Rio do Peixe-PB, que possui grande histórico de ocorrência de inundações. O desempenho de cada mapa foi analisado a partir da acurácia na classificação de pontos de referência com histórico de inundação. Assim, foi obtido um mapa de inundação para todo o município a partir do SRTM na resolução de 90m, onde foram identificadas áreas com alta susceptibilidade e assim gerado mapas para essas regiões, sendo dois do SRTM e limiar de drenagem de 2.500 e 1.000.000 pixels e dois do MDE ALOS PALSAR e limiar de 51.000 e 6.000.000 pixels. A análise do desempenho dos mapas identificou que o mapa do MDE SRTM com limiar de 2.500 pixels foi o com maior acurácia enquanto que o do MDE ALOS PALSAR com limiar de 51.000 pixels foi o menos representativo da área.

Palavras-chave: Suscetibilidade. Modelo Descrito do Terreno. Inundação.

ABSTRACT - The HAND model is a widely used tool to indicate areas susceptible to flooding. However, the choice of the font and resolution of the MDE influence the result. Thus, we sought to evaluate the performance of different DEMs in the generation of flood susceptibility maps using HAND. Using data from SRTM (90 and 30m) and ALOS PALSAR (12.5m). Having as study region the city of São João do Rio do Peixe-PB, which has a long history of flooding. The performance of each map was analyzed based on the accuracy in classifying landmarks with a history of flooding. Thus, a flood map for the entire municipality was obtained from the SRTM at a resolution of 90m, where areas with high susceptibility were identified and thus generated maps for these regions, two of the SRTM and drainage thresholds of 2.500 and 1.000.000 pixels and two of the MDE ALOS PALSAR and threshold of 51.000 and 6.000.000 pixels. The analysis of the performance of the maps identified that the MDE SRTM map with a threshold of 2.500 pixels was the most accurate, while that of the MDE ALOS PALSAR with a threshold of 51.000 pixels was the least representative of the area.

Keywords: Susceptibility. Described Terrain Model. Flooding.

INTRODUÇÃO

Segundo o Relatório Cidades do Mundo (UN-Habitat, 2016), o processo de urbanização é um fenômeno crescente em todas as partes do mundo. Esse crescimento, que geralmente ocorre de forma desordenada, acarretando transformações no meio natural, em muitos casos geram problemas ambientais, sociais e estruturais, tornando-se responsáveis pelo aumento da susceptibilidade a

eventos extremos de diversas naturezas (Filgueira & Barbosa, 2013; Santos et al., 2016; Reis & Schmidt, 2017).

Dentre as várias susceptibilidades que a população urbana está exposta, no Brasil, os desastres que mais impactam são os relacionados à seca e estiagem, às enxurradas e às inundações (UFSC, 2013). No espaço urbano, a ocorrência

de inundações está ligada às condições propiciadas pelo estado natural da bacia hidrográfica (relevo, tipo de precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, dentre outros), como também podem ser intensificados por processos de caráter antrópico, a exemplo da mudança de uso e ocupação dos solos e a impermeabilização (Tucci, 2003; Reis & Schmidt, 2017).

Além dessas causas, é importante ter ciência dos efeitos das inundações. As áreas atingidas sofrem perdas em níveis econômico, de saúde, social e ambiental. A gravidade dos problemas resultantes da inundação está principalmente relacionada à frequência de ocorrência do evento e às alterações geradas na região da várzea do rio, decorrentes da ocupação (Caldana et al., 2018).

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013), a região que mais possui registros de inundações é a Sudeste do Brasil, ocupando o Nordeste a segunda posição, contradizendo o senso comum de que esta região possui problemas apenas relacionados à seca.

Na região semiárida brasileira, os fenômenos de inundações são menos frequentes que os de seca. Porém, são originados devido à característica irregular de suas precipitações pluviométricas, que geralmente ocorrem em grandes volumes e em um curto período de tempo (Medeiros & Zanella, 2019). A relação do volume de precipitação pluviométrica com os eventos de inundação na região semiárida paraibana foi relatada anteriormente por Sousa (2013), que percebeu que nas cidades estudadas os eventos de inundação, registrados entre 1972 e 2009, estão sempre ligados a precipitações anuais próximas de 1.000 mm.

Entre as bacias hidrográficas inseridas no Nordeste do Brasil, a bacia hidrográfica do Rio do Peixe (BHRP) localizada no estado da Paraíba, enfrenta de forma recorrente episódios de inundações urbanas. Como exemplo, têm-se os eventos ocorridos na cidade São João do Rio do Peixe, que conta com registros fotográficos de inundações desde meados da década de 1950, sendo o seu registro oral muito mais antigo. Além da ocorrência de eventos de precipitação pluviométrica acima da média histórica, a relação entre a localização das cidades próximas ao curso do rio principal, a formação de solos argilosos em várias áreas e a atuação das atividades antrópicas tornam regiões da BHRP mais vulneráveis aos eventos de inundação (Pereira, 2009).

Para Filgueira et al. (2019), o entendimento da natureza física e histórica dos eventos naturais e

dos fatores socioeconômico-culturais, como também das políticas que moldam o impacto desses eventos sobre as comunidades vulneráveis é de grande importância para a redução da suscetibilidade a desastres.

Buscando à redução do impacto negativo causado pelas inundações, surge a necessidade da procura por medidas preventivas e corretivas. Dentre essas medidas, existem as medidas estruturais, que podem ser consideradas corretivas, geralmente ligadas a obras de engenharia; e as medidas não-estruturais, que podem ser preventivas e corretivas e estão ligadas, principalmente, ao melhor entendimento e convívio com a dinâmica do curso d'água (Justino, 2019).

No campo das medidas não-estruturais, o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a previsão e mapeamento de áreas com suscetibilidade a desastres relacionados com fenômenos naturais tem aumentado consideravelmente. É possível encontrar desde metodologias que necessitam do conhecimento de uma grande variedade de dados, como é o caso de modelos computacionais hidrodinâmicos, como também metodologias que buscam prever o comportamento dos rios conhecendo apenas a geomorfologia da região, como é o caso do modelo *Height Above the Nearest Drainage* (HAND) (Rennó et al., 2008).

O HAND é um descritor de terreno desenvolvido por pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que tem como premissa a determinação de um modelo de elevação normalizado em relação à rede de drenagem da área estudada. O HAND tem sido amplamente empregado, justamente por fornecer a vantagem de seu desempenho não depender de dados históricos de inundações anteriores ou de dados hidrológicos, o que o torna uma ferramenta de baixo custo e acessível a qualquer região que possua dados topográficos disponíveis (Rennó et al., 2008; Nobre et al., 2016; Mengue et al., 2017).

Para produção desses mapas pode ser utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE), que permite analisar características hidrológicas e topográficas da região, e com base nisso realizar a identificação e diagnóstico das áreas de risco (Silva et al., 2016). Inicialmente, os estudos que aplicavam o modelo HAND eram realizados a partir de modelos digitais de elevação (MDEs) da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) (Rennó et al., 2008, Cuartas et al., 2012; Pires & Borma, 2013). Nesses trabalhos utilizando dados SRTM, o desempenho do modelo HAND foi

considerado satisfatório para as áreas estudadas. No entanto, percebeu-se também que a resolução do MDE influencia no resultado final, principalmente em áreas de estudo de pequenas extensões, onde são omitidos os valores de declividade do terreno (Pires & Borma, 2013). Logo, os atributos derivados do MDE podem apresentar limitações. Embora largamente utilizados, muitos MDEs são empregados sem considerar questões como a escolha da resolução apropriada (Neuman et al., 2018).

A influência significativa das resoluções no detalhamento e na qualidade das representações tem levado diversos estudos a analisarem os efeitos da resolução espacial sobre a acurácia dos atributos derivados de MDEs de diferentes resoluções (Florinsky et al., 2002; Zhang et al., 2012; Neuman et al., 2018). O impasse da utilização de dados de alta resolução envolve a necessidade de grande capacidade de armazenamento, tempo elevado de processamento e em certos casos a existência de informações redundantes. Para o caso do emprego de baixas resoluções é necessário observar se esse produto

fornece de forma precisa os dados essenciais para a análise (Zhang et al., 2012). Devido à necessidade de se avaliar o real impacto do MDE no resultado final do modelo HAND, surgiram alguns estudos que utilizaram MDEs de alta resolução (Momo et al., 2016; Nobre et al., 2016; Goerl et al., 2017). No trabalho de Goerl et al. (2017), os autores concluíram que, para a área de estudo considerada, de, aproximadamente 136 km², a resolução do MDE não possuiu grande influência no resultado final do modelo HAND. Porém percebeu-se uma alta sensibilidade em relação à adoção do valor do limiar de drenagem. A mesma análise foi feita em estudos no estado da Paraíba por Alves (2019) e Justino (2019), onde, este último, concluiu que, para áreas pontuais, como sua região de estudo com área equivalente a 0,9 km², a resolução do MDE possui impacto direto no resultado final.

Partindo desses princípios, esta pesquisa teve por objetivo avaliar o desempenho MDEs de diferentes resoluções espaciais na geração de mapas de susceptibilidade a inundação utilizando o HAND.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudos e dados utilizados

A área de estudada corresponde a parcela urbana do município de São João do Rio do Peixe. O município está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe (BHRP), integrante da bacia hidro-gráfica do Rio Piranhas, situada

no extremo Noroeste do estado da Paraíba (Figura 1).

A BHRP ocupa uma área territorial de 3.475,74 km², onde estão inseridos 18 municípios. O seu rio principal é o Rio do Peixe que possui a extensão de 106,1 km.

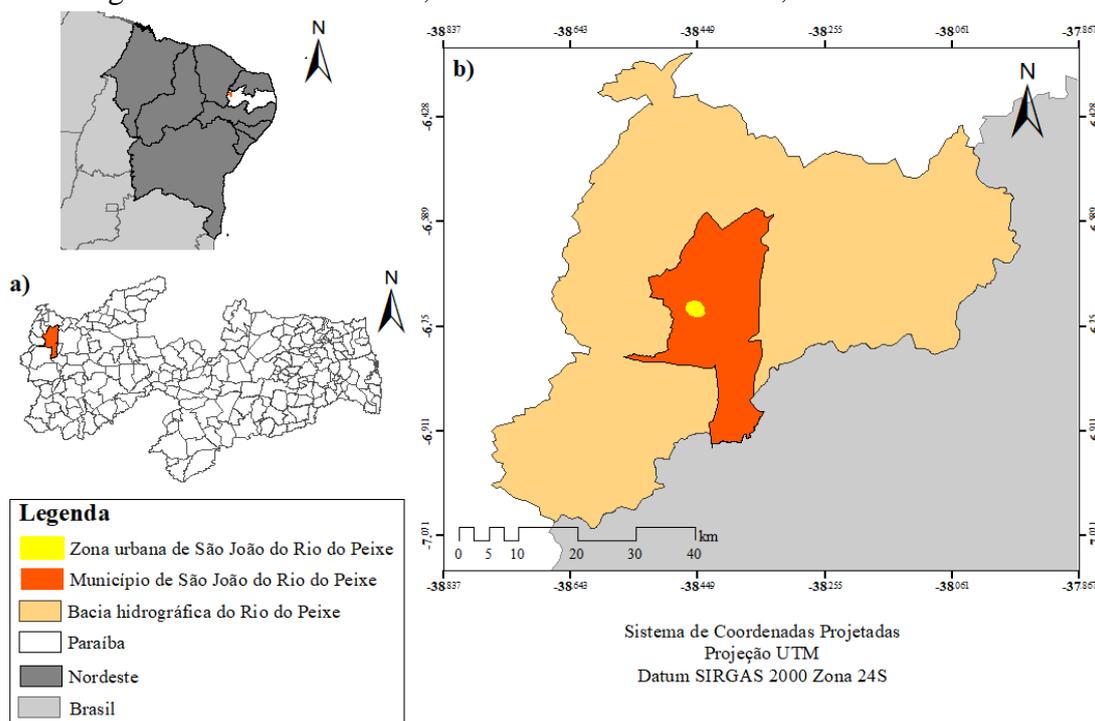


Figura 1 – (a) Localização do município de São João do Rio do Peixe na Paraíba e; b) Delimitação da bacia hidrográfica do Rio do Peixe (laranja claro), identificação do município de São João do Rio do Peixe no interior da bacia e de sua zona urbana (amarelo).

A rede de drenagem formada pelo rio principal e seus afluentes possui um regime de escoamento intermitente, um padrão de drenagem dendrítico e apresenta um valor de densidade de drenagem 1,1 km/km², o que significa uma drenagem na faixa de razoável a média (PDRH, 1996; CPRM, 2005; Sousa, 2013).

A BHRP é excepcionalmente importante para o estado da Paraíba, devido ao desenvolvimento de atividades econômicas diversas ao longo da sua área, como a agricultura irrigada (frutas tropicais, arroz etc.); exploração da água para o desenvolvimento industrial de alimentos; e da exploração da água in natura do tipo mineral (Sousa, 2013). No entanto, características naturais e antropológicas tornam a bacia hidrográfica susceptível a fenômenos de inundação.

Entre os aspectos naturais da BHRP que influenciam no escoamento dos cursos d'água têm-se o seu formato, onde pelos valores dos parâmetros de fator de forma ($K_f = 0,43$) e coeficiente de compacidade ($K_c = 1,89$), indicam ser uma bacia hidrográfica de formato ligeiramente alongado, relativamente compacto e regular. De acordo com essa característica é possível considerar que a BHRP estaria sujeita a cheias intensas, porém de curta duração (PDRH, 1996; Cardoso et al., 2014).

A BHRP ainda tem sofrido ao longo dos anos as consequências da ocupação humana, por meio da ocupação da calha do rio e de intervenções na drenagem, como a construção de pequenas barragens e de barramentos no leito do Rio do Peixe próximo a cidade (Cunha et al., 2012). Ainda é notado, a partir da análise do Índice de Vegetação Normalizada (NDVI na sigla em inglês), a redução considerável na vegetação na cidade de São João do Rio do Peixe e em outras áreas do baixo curso da bacia hidrográfica (Sousa, 2013).

Já acerca do município de São José do Rio do Peixe, esse possui uma área territorial de, aproximadamente, 473,75 km², com a população estimada pelo Censo Demográfico do ano de 2010 de 18.201 habitantes, sendo destes, em 2010, 6.885 habitantes vivendo em ambiente urbano, o que corresponde a 37,83% da população total do município (IBGE, 2020).

O município possui um clima classificado como Tropical Chuvoso, caracterizado como quente e úmido, com chuvas concentradas no verão e precipitações máximas no outono. Apresenta precipitações pluviométricas concentradas nos meses de março e junho, com média acumulada anual igual

a 860,33 mm (Pereira, 2009; AESA, 2019).

Também existem anos excepcionais, em que a precipitação pluviométrica acumulada anual registrada foi maior que 1.000 mm, como em 2008 e 2009, anos marcados por eventos de inundação.

Em relação à geomorfologia, a área de estudo está localizada na Sub-Bacia Sedimentar de Sousa, cujo relevo é considerado predominantemente plano a suave-ondulado. A sua vegetação é caracterizada como sendo do tipo xerófito, que pertence ao bioma Caatinga, onde possui um aspecto homogêneo, geralmente de porte arbóreo e arbustivo (Paraíba, 1996).

O município está localizado no trecho da planície fluvial do médio curso do Rio do Peixe, mais precisamente, na área do Leito Maior Excepcional. A parte Nordeste e Noroeste corresponde a área drenada pelo riacho Olho D'Água que contorna essa parte da cidade e deságua no trecho do Rio do Peixe (Figura 2) (Pereira, 2009).

Os problemas decorrentes de inundações impactam a cidade de São João do Rio do Peixe desde a década de 1940 (Pereira, 2009). Entretanto, a partir dos anos de 1970, com o processo de urbanização e a ocupação de áreas próximas ao leito do Rio do Peixe, a situação foi agravada, intensificando não apenas pelas inundações, mas também por problemas ambientais e urbanos ligados a saneamento básico (Sousa, 2013).

Modelo digital de elevação

O dado de entrada para a obtenção da matriz HAND é o modelo de elevação digital (MDE) da área objeto de estudo. Neste trabalho utilizou-se três fontes de MDEs: sendo duas de resoluções diferentes de 30 e 90 m da missão SRTM da NASA, de 2000; e o MDE proveniente das imagens do satélite ALOS PALSAR, lançado pela Agência de Exploração Aeroespacial Japonesa (JAXA).

A missão SRTM foi a pioneira no mapeamento de relevos da área continental do mundo, abrangendo em sua cobertura 80% das áreas emersas do planeta (Grohmann et al., 2008). Por possuir uma grande área de cobertura, os dados SRTM são um dos mais conhecidos e utilizados em análises digitais (Macêdo & Surya, 2018).

Os dados obtidos por essa missão foram com resolução espacial de 30 m por 30 m, porém a única região que possuía dados com essa resolução espacial era a área dos Estados Unidos da América. Para o restante do mundo, ocorreu a reamostragem dos dados para a resolução espacial de 90 m por 90 m (Rodrigues et al., 2011). A partir de 2014, os dados com resolução espacial de 30 m por 30 m



Figura 2 - Localização da rede de drenagem do Rio do Peixe próxima à cidade de São João do Rio do Peixe – PB.

foram disponibilizados para toda a área coberta pela missão (ESRI, 2014). Contudo, neste estudo, utilizou-se apenas os MDEs com resoluções espaciais de 90 m por 90 m e 30 m por 30 m.

Por sua vez, o ALOS PALSAR é um satélite do tipo de “Satélite Avançado de Observação Terrestre-1” (ALOS na sigla em inglês para *Advanced Land Observing Satellite*), equipado com o sensor de microondas PALSAR (sigla em inglês para *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), que opera com resoluções espaciais que variam entre 10 e 100 metros e foi objeto de uma missão da JAXA durante o período de 2006 a 2011 (ASF, 2020). O objetivo dessa missão foi contribuir com os campos de mapeamento, observação precisa da cobertura territorial regional, monitoramento de desastres e levantamento de recursos (ASF, 2020). Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se o MDE obtido a

partir de imagens de 2011 do ALOS PALSAR, cuja resolução espacial corresponde a 12,5 m por 12,5 m.

Escolheu-se utilizar três fontes de dados com resoluções espaciais distintas justamente para promover uma comparação entre os resultados gerados, a partir de cada MDE com dados históricos, de modo a determinar qual melhor se aproximou da situação real.

Ressalta-se que a utilização de MDEs distintos para a determinação de redes de drenagem pode acarretar diferentes traçados em decorrência de eventuais distorções geradas durante o próprio processo de determinação. Sousa (2016) afirma que essas distorções surgem devido a diversos fatores, como por exemplo, a reprojeção do sistema de coordenadas de geográficas para planas, a resolução espacial do MDE e também a topografia real da região estudada.

APLICAÇÃO DO MODELO HAND PARA A ESTIMATIVA DE ÁREAS PASSÍVEIS DE INUNDAÇÃO

O mapeamento de áreas inundáveis com o uso do modelo HAND é obtido a partir da normalização do MDE da área de estudo em relação a um canal de drenagem (Momo et al., 2016). Essa normalização é realizada a partir da diferença entre a altitude do terreno e a altitude do canal de drenagem mais próximo, sendo que quanto mais próximo ao local estiver do canal e quanto menor a variação de elevação entre eles,

maior será a suscetibilidade a inundação do local (Goerl et al., 2017).

Para a obtenção da normalização do MDE e, conseqüentemente, da obtenção das manchas de inundação pelo HAND, faz-se necessário, inicialmente, corrigir o MDE com o intuito de eliminar eventuais falhas que possam vir a prejudicar a conexão do fluxo da drenagem e posteriormente determinar as direções de fluxo

de drenagem (*lightly-doped-drain* – LDD, em inglês) (Momo et al., 2016).

Assim, durante a determinação do fluxo do canal, há a identificação das depressões, que são células que apresentam uma altimetria incoerente com as vizinhas, causando interrupção da rede de drenagem. Essa incoerência pode ser natural (como no relevo cárstico), ou como na maioria dos casos representam ruídos dos dados gerados durante o processamento topográfico (Momo et al., 2016).

Por esse motivo, é necessário realizar a correção do MDE a partir da remoção das depressões, sendo utilizado neste trabalho o algoritmo presente no Sistema de Informação Geográfica (SIG), *TerrSet*, desenvolvido pela Clark Labs. Esse algoritmo utiliza os procedimentos de escavação (*carving*) ou de preenchimento (*filling*) dos *pixels*, baseando-se nos valores das cotas dos seus pontos vizinhos em direção ao exutório. Nobre et al. (2011) afirmam que a correção do MDE é um ponto crucial para o bom desempenho do modelo HAND, visto que as altitudes do canal de drenagem são utilizadas para calcular a alturas normalizadas do sistema em estudo.

Posteriormente a LDD é obtida, definindo-se o ponto mais baixo do MDE, o qual será considerado o exutório do canal. Após a definição do exutório, é aplicada uma metodologia para a determinação da direção do fluxo do canal. Neste trabalho foi utilizada a metodologia *Deterministic Eight-Neighbors* (D8) (Buarque et al., 2009), analisando os oito pontos vizinhos para cada ponto da matriz, em que a direção adotada é a de maior declividade, isto é, na direção do vizinho com valor mais baixo (Alves, 2019).

Após a correção do MDE e a determinação da LDD, constrói-se a matriz de áreas acumuladas de drenagem, que é obtida por meio do cálculo da área acumulada de cada ponto da matriz de direções. Esse cálculo é feito considerando a direção de fluxo determinada na LDD, onde o valor de cada ponto da matriz de área acumulada é igual ao número de *pixels* da matriz LDD que convergem para cada ponto.

Com a matriz de área acumulada e adotando-se um limiar de drenagem, obtém-se a matriz de rede de drenagem, que é um dos dados de entrada para a criação da matriz HAND. O limiar de drenagem é um ponto da matriz de área acumulada adotado como sendo o ponto mínimo da rede de drenagem que se busca determinar. É a partir dele que é possível definir a rede de drenagem,

que será formada pelos pontos que possuem valores maiores que o limiar considerado.

Para Momo et al. (2016) e Goerl et al. (2017) quanto maior o valor do limiar mínimo de drenagem adotado, menor será a grade que forma a rede de drenagem, o que é responsável por definir o grau de detalhamento do canal estudado. Sendo assim, a determinação da rede de drenagem depende do valor mínimo considerado para área de drenagem. Com isso, para que a rede de drenagem chegue a uma representação mais fidedigna da realidade, é importante que o valor de área de drenagem não seja determinado de forma aleatória, passando por critérios de análise na sua escolha.

No caso deste trabalho, o valor da área de drenagem foi atribuído a partir de um processo de tentativa e erro utilizando diferentes limiares (1.000, 2.000, 4.000, 6.000 e 10.000 *pixels*). A definição do limiar mais adequado foi feita a partir da utilização das métricas de deslocamento horizontal do início da rede gerada a partir do MDE x início da rede de drenagem de referência e da diferença do total de comprimento de drenagem do que mais se aproximavam da rede de drenagem de referência disponibilizada pela Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AESAs). A rede de drenagem de referência foi produzida pela AESA a partir das imagens da adaptada da SUDENE e imagens de Satélite LANDSAT 7, sendo disponibilizada em uma escala de 1:600.000. É importante ressaltar que o valor do limiar de drenagem varia de acordo a resolução espacial do MDE.

Com isso, a partir da obtenção da rede de drenagem gera-se a matriz HAND, na qual calcula-se a diferença de valores entre os pontos da rede de drenagem e os demais pontos do MDE de entrada de dados. E por fim, zera-se os valores dos pontos que compõem a rede de drenagem, onde os demais pontos terão valores iguais à diferença calculada anteriormente.

Avaliação das informações geradas

Para a avaliação das manchas de inundações pelo HAND e também para a obtenção de informações sobre as alturas das lâminas máximas alcançadas pelo Rio do Peixe.

Foi realizada uma consulta ao HIDROWEB, uma ferramenta do Sistema Nacional de informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que fornece dados de níveis fluviais. Essa ferramenta fornece dados de duas estações fluviométricas na região de estudo, a do açude de Pilões e do açude

Chupadouro, ambas com uma cobertura temporal de abril 2018 a dezembro de 2021, não incluindo nenhum dos períodos em que houve inundações na região.

Para obtenção de informações em um período em que foi constatada inundação na cidade, foi utilizada como fonte bibliográfica o trabalho de Pereira (2009), onde foi relatada informações sobre a última inundação que ocorreu na cidade de São João do Rio do Peixe no ano de 2009. Para validação das informações sobre o nível de água durante esses eventos, fornecidas por Pereira (2009), foi realizada visita de campo dos locais da cidade onde são constatadas recorrentes de inundações, de modo a coletar informações

Desse modo, os pontos visitados foram adotados como referência para avaliar a acurácia dos mapas de diferentes resoluções. Para região, como não há disponível registros históricos de manchas de inundação de referência, foi adotada como referência a localização dos 12 pontos visitados com históricos de inundações, de modo que a métrica

definida para avaliação do desempenho dos mapas de diferentes resoluções foi a acurácia de cada mapa em classificar os pontos e vizinhança em áreas de alta susceptibilidade a inundação.

Determinação de Áreas suscetíveis a Inundação

Nessa etapa final ocorre a definição da altura máxima de elevação da lâmina de água alcançada pelo rio por meio de dados históricos, e adoção de uma quantidade de intervalos (fatias) de classificação entre os valores mínimo e máximo. Como o valor da altura influi diretamente nas áreas que serão inundadas, para escolha desse foi feito o teste de diferentes lâminas de inundação, até que a determinação das extensões de inundações incluísse os locais conhecidos atingidos por inundações passadas.

Para o caso de abrangência municipal, foi estabelecida a correlação da susceptibilidade a cada uso e ocupação. Assim, foram consideradas três classes para a elaboração do mapa de áreas suscetíveis a inundação, de modo a atribuir diferentes pesos para cada classe de uso (Figura 3).

<i>Suscetibilidade</i>	<i>Critério</i>	<i>Peso</i>
Alto	Área urbana	50
Médio	Área de agropecuária e Área de solo exposto	20
Baixo	Vegetação natural	10

Figura 3 - Critérios para determinação da susceptibilidade a inundação.

O índice de alta susceptibilidade a inundação foi estabelecido em regiões com ocupação de áreas urbanas, diante da possibilidade de perda de vidas humanas pela ocorrência de afogamentos ou ainda pela disseminação de doenças de veiculação hídrica, acrescido das perdas econômicas pelo dano material que a invasão da água a residências pode causar.

As inundações em áreas com outro tipo de intervenção antrópica, com uso e ocupação por atividades agrícolas e criação de animais, bem como regiões degradadas de solo exposto foram consideradas de média susceptibilidade; por apresentarem susceptibilidade de perdas econômicas em pastagem e plantações; e pela susceptibilidade de maior degradação ambiental devido a retirada da vegetação em regiões de solo exposto.

As regiões de vegetação natural foram relacionadas à baixa susceptibilidade, uma vez que sua inundação possivelmente não ocasionará grande impacto social, econômico e ambiental pelo amortecimento da cobertura vegetal.

Além dos pesos atribuídos aos diferentes usos, foram também criados critérios para a atribuição

de pesos às regiões sujeitas ou não a inundação, de modo que as regiões atingidas pela mancha de inundação recebam peso 100 e as não atingidas pela mancha de inundação, peso 1.

Dessa forma, os critérios de uso e ocupação do solo e de mancha de inundação foram combinados utilizando o procedimento de álgebra de mapas para soma dos pesos, de modo a verificar quais usos do solo seriam diretamente impactados pelo evento de inundação considerado.

Assim, regiões com pontuação menor do que 100 (11, 21 e 51) não eram inundáveis, enquanto regiões com pontuações maiores do que 100 apresentavam algum nível de susceptibilidade a inundação (110 – baixa susceptibilidade, 120 – média susceptibilidade e 150 – alta susceptibilidade).

Para a análise na escala da área urbana, a rede de drenagem da BHRP foi dividida em várias “sub-bacias hidrográficas”, a fim de se obter limiares de drenagem de valores menores para a melhor caracterização dos canais de drenagem existentes na mancha urbana.

Após isso, foi utilizado o critério de fatiamento da mancha HAND obtida. Os níveis

de suscetibilidade de desastres por inundação foram então classificados em: muito alto, quando a área tinha a mesma cota em relação a drenagem; alto, quando tinha uma pequena variação da cota da região em relação ao canal de drenagem; médio, quando essa variação era um pouco maior; e baixo, quando existia uma variação superior ao limiar de drenagem encontrado.

Mapa de uso e ocupação

Para determinação do uso e ocupação do solo da cidade de São João do Rio do Peixe, foi utilizado como fonte o mosaico de imagens, classificadas e disponibilizadas como produto na plataforma de dados MapBiomas (MapBiomas, 2019).

O MapBiomas trata-se de um projeto de mapeamento anual da cobertura e uso do solo do Brasil. Por meio do processamento em nuvem e classificadores automatizados, especialistas integram o SIG e ciência da computação para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil (MapBiomas, 2019).

Assim, foi feito o *download* do bioma Caatinga, no qual está inserida a área de estudo, com 33 camadas disponíveis, correspondentes ao uso e

ocupação dos anos de 1985 a 2018, sendo selecionada a camada mais recente. Em seguida, a camada passou pelo processo de recorte utilizando a “máscara do município”, disponibilizada pela AESA. Após a delimitação da área de estudo, o produto passou por um processo de reclassificação em cinco categorias de uso e ocupação, geradas a partir da adaptação das categorias do MapBiomas, de forma a facilitar a aplicação metodologia a ser adotada.

Na figura 4 está exposta a disposição espacial do uso e ocupação do solo do município de São João do Rio do Peixe, para o ano de 2018. A sua análise permite identificar que maior parte da área é ocupada por vegetação natural (64%) tendo uma concentração maior na porção Sul, porém se distribui ao longo de todo o município. Outro uso com grande ocupação é o de agropecuária (34%), que também se espalha ao longo de todo município. As outras três classes de uso e ocupação do solo possuem proporções relativamente pequenas, sendo solo exposto com 1,1% e corpos d’água com 1,1% verificadas em todo o município, e área urbana, com 0,1%, concentrada na sua região central.

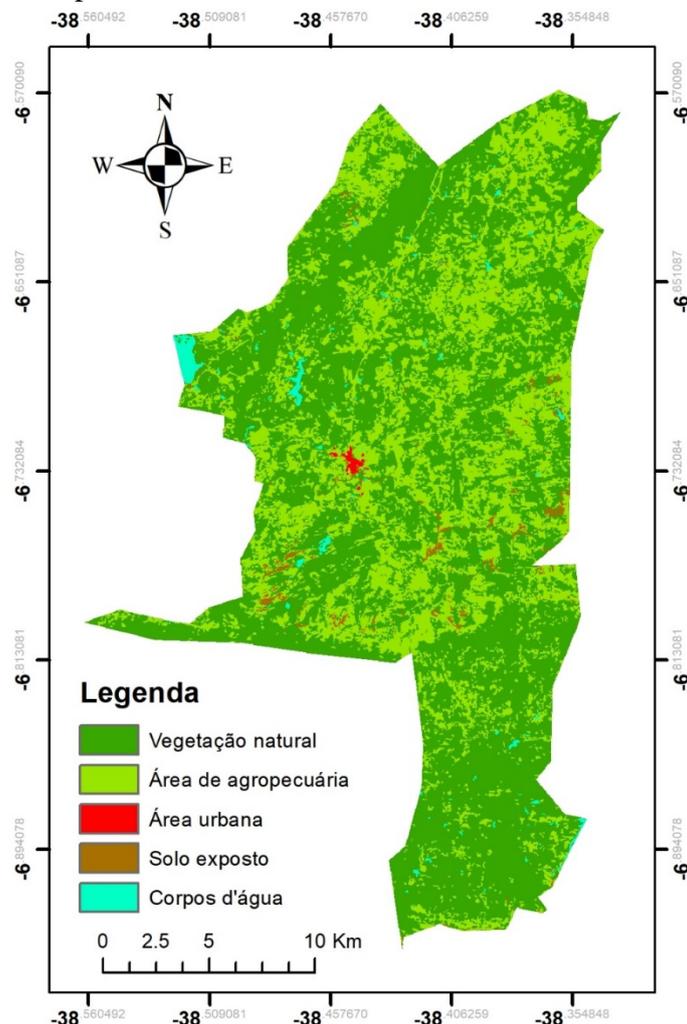


Figura 4 - Uso e ocupação do solo do município de São João do Rio do Peixe, Paraíba.

Apesar de ser a menor concentração de uso no município, a área urbana é a ocupação mais vulnerável a ocorrência de inundações. No entanto,

essa concentração de eventos no núcleo urbano, pode facilitar a adoção de medidas mitigadoras contra inundações.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na análise inicial, em que foi considerado todo o município de São João do Rio do Peixe e utilizado o MDE SRTM de resolução espacial de 90 m por 90 m, a rede de drenagem obtida, após

diferentes áreas mínimas de acúmulo de drenagem consideradas, foi a extraída com base em uma área mínima (limiar de drenagem) de 4.000 *pixels* (Figura 5).

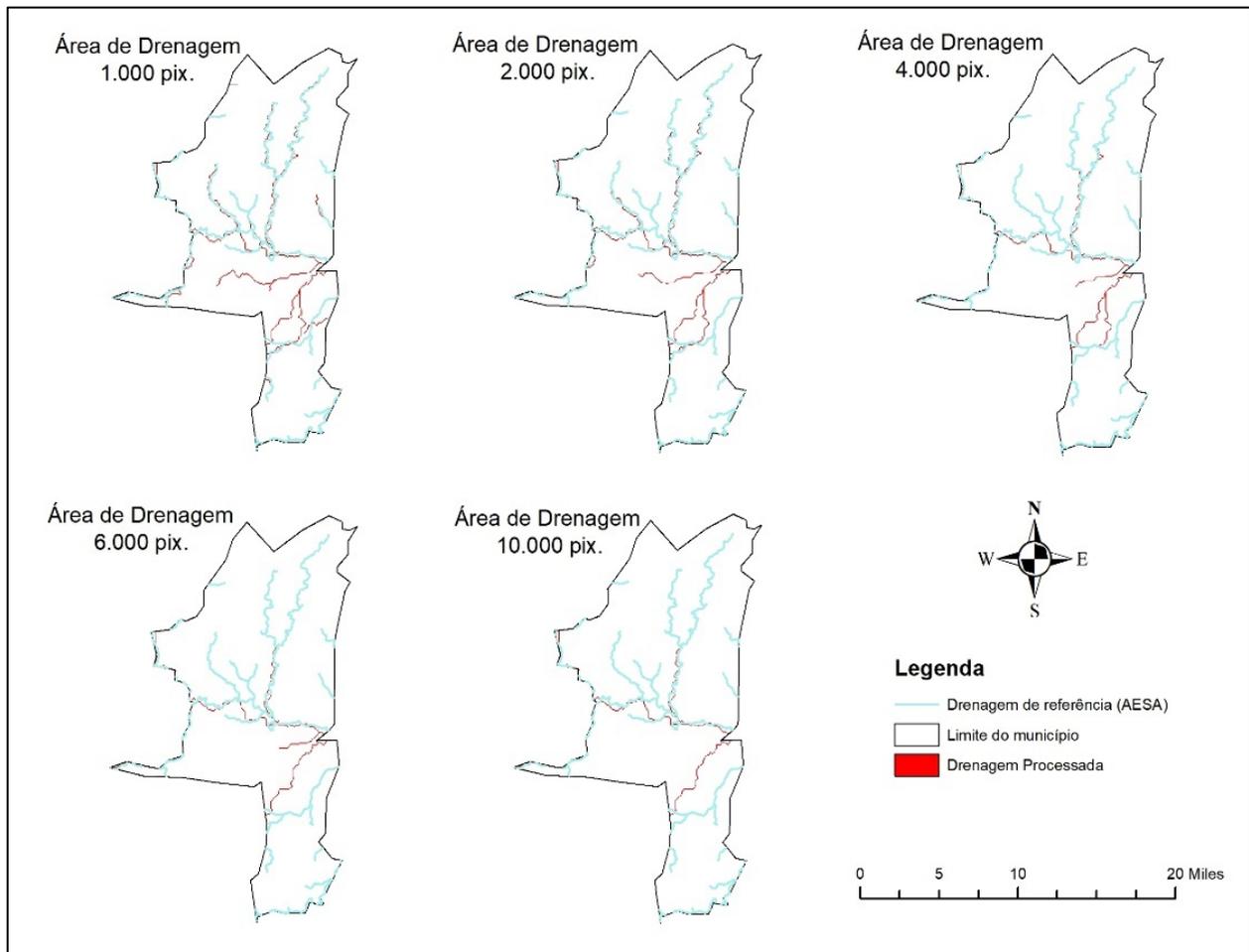


Figura 5 - Redes de drenagem com diferentes limiares extraídas a partir do MDE SRTM de resolução espacial de 90 m por 90 m.

Os valores menores testados (1.000 e 2.000 pixels), apesar de proporcionarem rios mais longos, condizentes com os existentes na rede de referência, também ocasionaram o surgimento de diversos “rios menores” não existentes na mesma; e por este motivo foram descartados. Dessa forma, mais áreas estariam suscetibilidade a inundações e, por este motivo, essas drenagens foram descartadas.

Os valores maiores testados (6.000 e 10.000 pixels), apesar de possuírem uma menor concentração de rios que não existem na drenagem de referência, acabaram processando os rios indicados na drenagem de referência com menores extensões. O encurtamento das extensões dos rios acabaria por causar discordância na análise de suscetibilidade, deixando de abarcar áreas susceptíveis,

com isso essas representações da drenagem não foram consideradas.

A altura inundável considerada foi de 3 m. Esse valor foi determinado com base nas cotas de inundações, entre 242 m e 245 m, verificadas em eventos anteriores (Pereira, 2009) e validadas em visitas de campo realizadas nos locais onde ocorre as inundações.

O mapeamento das áreas suscetíveis a desastres gerado pelo modelo HAND e determinado após a sobreposição da área inundável, e do mapa de uso ocupação do solo estão representados na figura 6. A maior parte da área territorial do município não é atingida pela mancha de inundações (89,8%). Contudo, as áreas atingidas pela mancha de inundações representam 6% para baixa suscetibilidade, 4% média suscetibilidade e 0,2% para

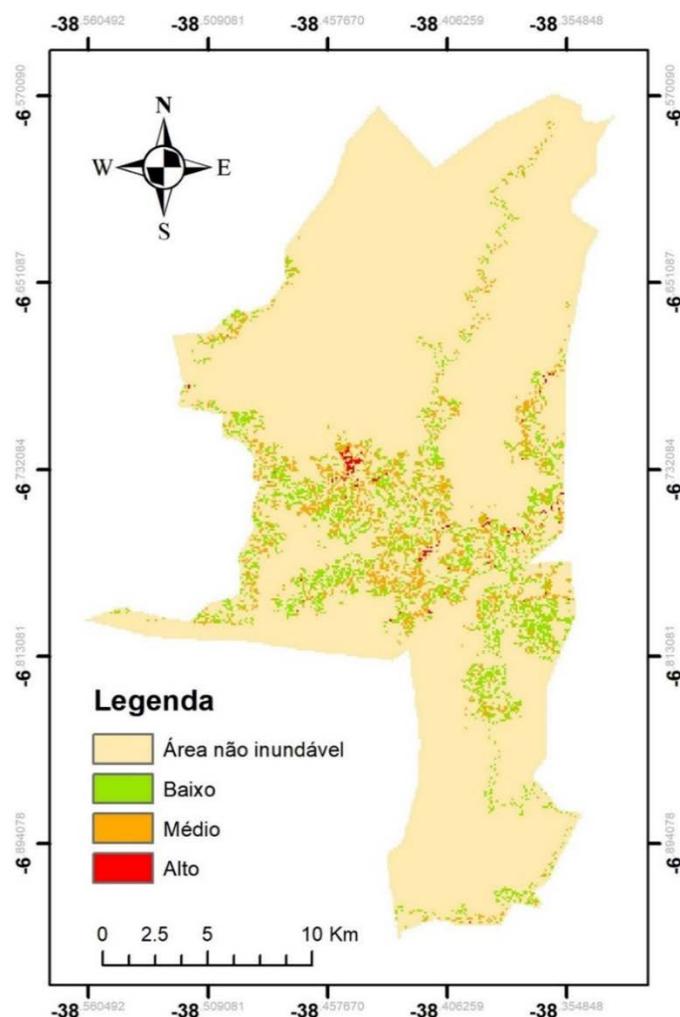


Figura 6 - Mapa de áreas suscetíveis a inundação no município de São João do Rio do Peixe.

alta suscetibilidade. A zona urbana, entretanto, que possui maior concentração populacional, está completamente compreendida na área inundável da região.

A verificação da ocupação do solo ao longo dos corpos hídricos superficiais pode ser confirmada por meio da existência de áreas alta e média suscetibilidade ao longo da extensão de todos os rios aqui considerados, com construção de moradias, alta suscetibilidade; e plantação de culturas e/ou criação de animais, média suscetibilidade. Todas as áreas inundáveis classificadas como baixa suscetibilidade representam vegetação nativa remanescente, apesar da ocupação humana.

Ao se verificar que a zona urbana do município está inserida totalmente na área considerada de alta e média suscetibilidade, houve a necessidade de realizar um estudo detalhado dessa região, a partir da utilização do MDE SRTM com resolução espacial de 30 m por 30 m e o MDE ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m por 12,5 m.

Assim, para o estudo da suscetibilidade a

inundação na cidade de São João do Rio do Peixe, adotou-se um limiar de drenagem de 2.500 *pixels* para o MDE SRTM com resolução espacial de 30 m por 30 m; e um limiar de drenagem de 51.000 *pixels* para o MDE ALOS PALSAR. Foram utilizados como dados de entradas as “sub-bacias hidrográficas” recortadas a partir do canal de drenagem real da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, o que resultou em uma grande diferença na área de contribuição dos dois modelos e, conseqüentemente, na extensão da rede de drenagem gerada (Figura 7).

O motivo para essa disparidade é devido ao formato da sub-bacia hidrográfica do MDE SRTM. Foi verificado que valores muito altos de limiar de drenagem resultava na desconsideração do leito principal do Rio do Peixe, como parte da rede de drenagem da área. A partir das matrizes de rede de drenagem geradas, foram determinados os mapas gerados pelo modelo HAND para as duas sub-bacias hidrográficas, que são os MDEs normalizados em relação ao canal de drenagem considerado em cada caso.

A) MDE SRTM com resolução espacial de 30 m por 30 m, com limiar de drenagem de 2.500 pixels

B) MDE SRTM ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m por 12,5 m, com limiar de drenagem de 51.000 pixels

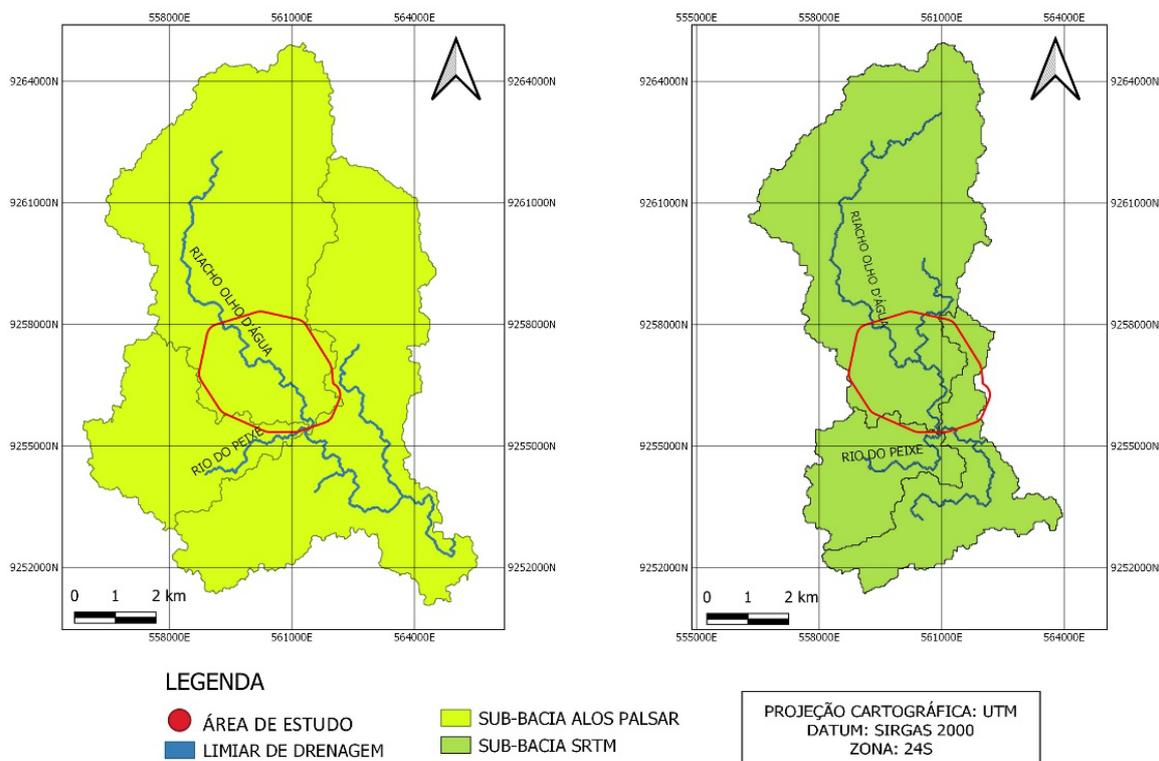


Figura 7 - Redes de drenagem obtidas a partir dos limiares de drenagem adotados para a zona urbana da área de estudo: a) MDE SRTM com resolução espacial de 30 m por 30 m, com limiar de drenagem de 2.500 pixels; b) MDE ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m por 12,5 m, com limiar de drenagem de 51.000 pixels.

Com base nos mapas HAND obtidos, foi realizado o recorte da área que compreende a cidade de São João do Rio do Peixe, com o intuito de analisar quais regiões da cidade estão em áreas com populações consideradas suscetíveis às inundações.

Para que essa análise fosse possível, foi feito o fatiamento do mapa HAND adotando-se uma escala de suscetibilidade baseada nas lâminas de água alcançada em eventos de inundação passados. Essas lâminas foram estimadas a partir dos históricos das últimas inundações obtidos por meio da visita de campo e dos relatos de Pereira (2009).

Pelo fatiamento da mancha HAND obtida, a suscetibilidade a inundação foi classificada em:

- *Nível muito alto*: áreas com cota 0 em relação ao canal de drenagem;
- *Nível alto*: áreas com cota entre 1 e 2 m em relação ao canal de drenagem;
- *Nível médio*: áreas com cota entre 2 e 3 m em relação ao canal de drenagem;
- *Nível baixo*: áreas com cotas superiores a 3 m.

Os mapas HAND de áreas propensas a suscetibilidade a inundação da cidade de São João do Rio do Peixe foi gerada combinando os

modelos HAND obtidos e imagens do Google Earth (Figuras 8 e 9). Realizando uma análise comparativa entre os mapas HAND obtidos, foi possível verificar através da quantidade de pixels de cada classe que o valor do limiar de drenagem escolhido tem grande influência no resultado final do modelo HAND. Pois, quanto mais próximo conseguir ajustar o limiar de drenagem para a rede real de drenagem da região, mais representativo será o mapa de suscetibilidade a inundação no modelo HAND obtido.

Com o auxílio do Google Earth a partir das informações obtidas em Pereira (2009) e da visita de campo foi possível analisar qual dos MDEs gerados tem maior acurácia em incluir os pontos de referência como regiões de alta suscetibilidade a inundação, sendo assim considerado o mapa de suscetibilidade a inundação mais representativo para a cidade de São João do Rio do Peixe.

Apesar de ter uma resolução espacial melhor quando comparado com os demais MDEs utilizados neste trabalho, o mapa de suscetibilidade a inundação menos representativo da área de estudo foi o do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 51.000 pixels. Isso porque a acurácia, dentre os 12 pontos visitados com rios de inunda-

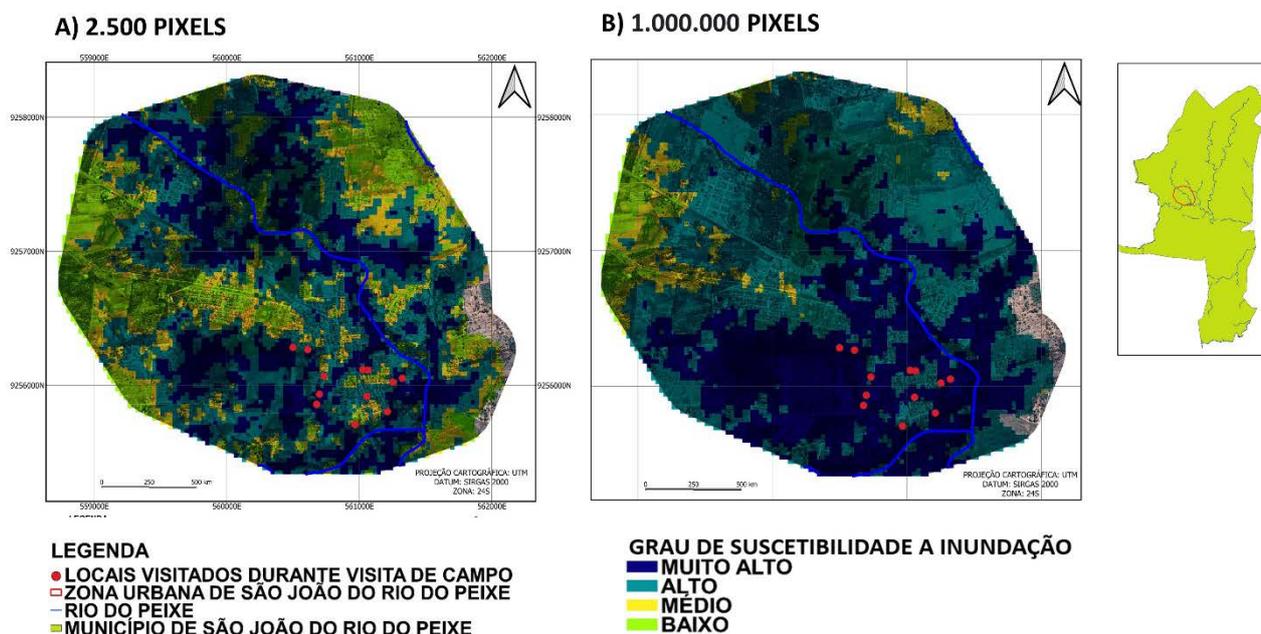


Figura 8 - Mapa de áreas suscetíveis a inundações da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE SRTM com resolução espacial de 30 m por 30 m e limiar de drenagem de 2.500 e 1.000.000 pixels.

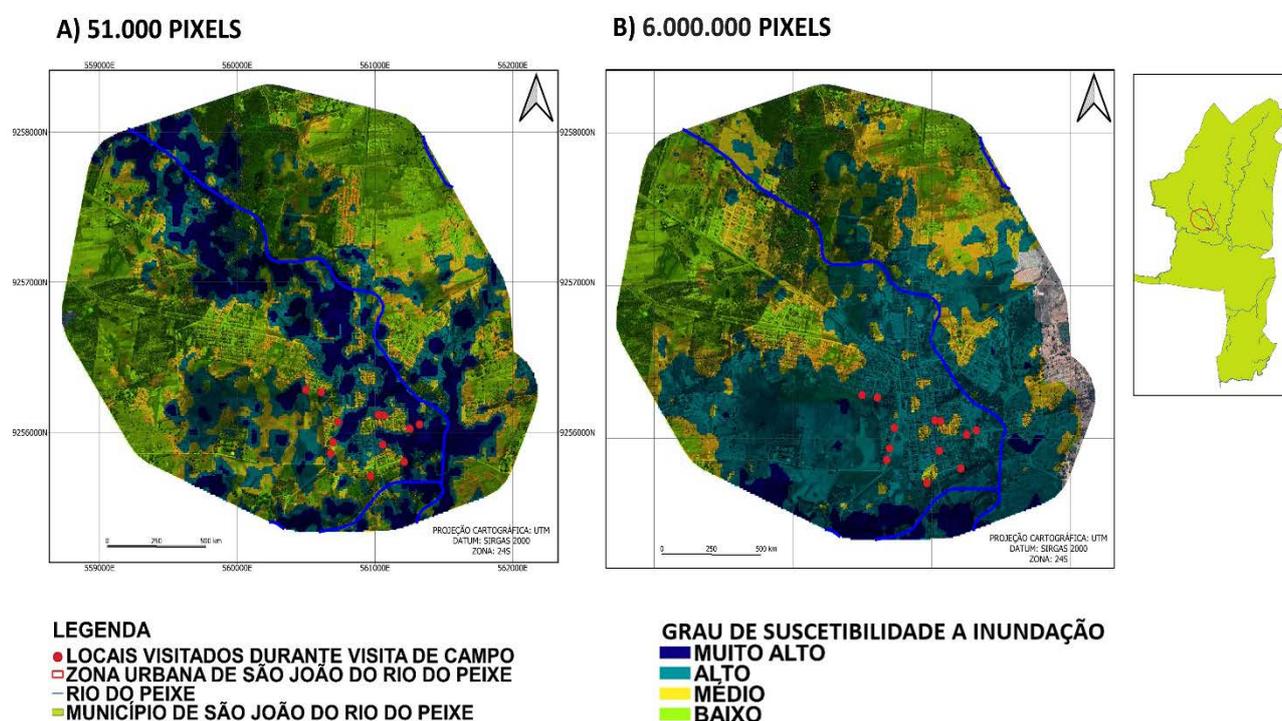


Figura 9 - Mapa de áreas suscetíveis a inundações da cidade de São João do Rio do Peixe obtido a partir do modelo HAND originado do MDE ALOS PALSAR com resolução espacial de 12,5 m por 12,5 m e limiar de drenagem de 51.000 e 6.000.000 pixels.

ções, apenas dois foram incluídos como alta suscetibilidade, sendo os outros considerados na faixa de média e baixa suscetibilidade (Figura 10).

Tendo por base o histórico de inundações da região, o bairro da Estação é um dos pontos mais críticos da cidade. Há registros de inundações em toda a região que compreende o bairro, com históricos de desastres relacionados às altas lâminas de água que resultaram em realocação provisória da população e perdas de bens mate-

riais. Nessa região o mapa suscetibilidade do MDE ALOS PALSAR com limiar de drenagem de 51.000 pixels teve baixa acurácia, incluindo os cinco pontos de referência do bairro na faixa de média e baixa suscetibilidade.

Em relação ao modelo mais representativo da área de estudo, constatou-se que o mapa HAND com o MDE SRTM com limiar de drenagem de 2.500 pixels foi o mais aproximado, ao comparar com as informações dos pontos visitados e também

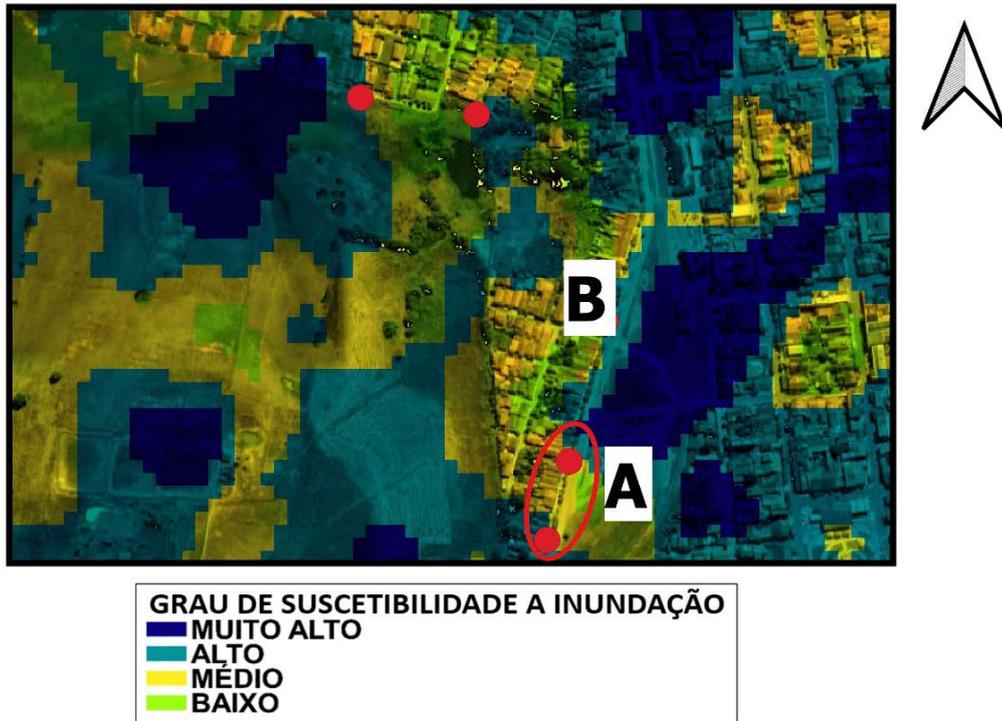


Figura 10 - Pontos de inundações subestimados no mapa HAND com o MDE ALOS PALSAR de resolução espacial de 12,5 m por 12,5 m e limiar de drenagem de 51.000 *pixels* - bairro da Estação: (A) vista de um ponto periférico e (B) vista de um ponto no interior.

dos registros de Pereira (2009) e por isso, ele foi considerado o mapa de suscetibilidade a inundações da região estudada.

Apesar disso, esse mapa também apresentou

algumas regiões com superestimação da mancha (Figura 11), como é o caso da região Sul da cidade, onde se localiza o bairro Central e da região Leste, onde se localiza o bairro da Gruta.

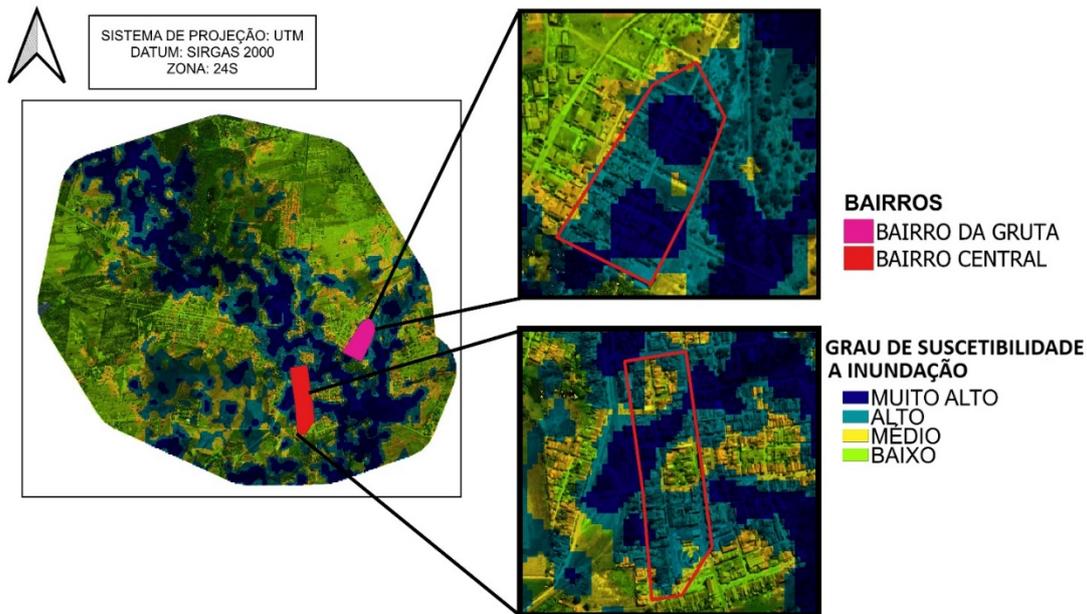


Figura 11 - Regiões da área de estudo cujo grau de suscetibilidade foi superestimado no modelo HAND com o MDE SRTM de resolução espacial de 30 m por 30 m e limiar de drenagem de 2.500 *pixels*.

No bairro Central, de acordo com os moradores das residências situadas próximas à margem do Rio do Peixe, mesmo nas maiores inundações registradas, o nível do rio não chega a invadir as edificações nessa região. E também não atinge ao perímetro próximo à praça Matriz, o que pode ser constatado como uma área de

baixa suscetibilidade a inundações.

No bairro da Gruta, de acordo com Pereira (2009), apenas a região Leste é propícia a inundações. Entretanto, as águas não chegam a inundar a região que compreende as edificações do local, onde pode ser considerado como média ou baixa suscetibilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a degradação das áreas da bacia hidrográfica do Rio do Peixe e a intensificação da ocorrência de eventos climáticos adversos, a avaliação da suscetibilidade de desastres por inundação mostra-se muito relevante também na região de clima característico de semiárido. O conhecimento da suscetibilidade a inundação pode auxiliar nas ações de políticas públicas que visem a solução dos problemas de ordenação e organização do espaço urbano da região.

Para pequenas cidades, entretanto, a carência de dados de campo pode ser um empecilho para proposição de medidas mitigadoras. Dessa forma, a utilização de dados obtidos remotamente atrelada a técnicas de SIG e métodos adequados, pode servir como uma metodologia alternativa para realização de estudos que permitam o maior conhecimento da área. Por meio dos resultados obtidos neste trabalho foi possível verificar que, apesar de possuir uma frequência relativamente menor em relação aos desastres ligados à seca, os desastres por inundações também possuem grande impacto na cidade de São João do Rio do Peixe.

A aplicação do modelo HAND como meio para obtenção dos mapas de inundação forneceu dados coerentes de regiões suscetíveis, partindo da comparação das características hidrogeológicas da bacia hidrográfica e do conhecimento das áreas que foram atingidas em eventos anteriores de inundação.

Entretanto, foi constatado que para um resultado satisfatório a partir dessa metodologia é

necessário se ter o conhecimento prévio sobre o comportamento da rede de drenagem do objeto de estudo, visto que a calibração da matriz de rede de drenagem é o ponto chave para a obtenção de bons resultados do modelo HAND.

Atrelado a isso, verificou-se também que a acurácia dos resultados depende da qualidade do MDE utilizado e, principalmente, da adoção do valor de limiar de drenagem adequado para a rede de drenagem local, sendo possível identificar a partir da análise do desempenho dos mapas que o mapa do MDE SRTM com limiar de 2.500 pixels foi o com maior acurácia enquanto que o do MDE ALOS PALSAR com limiar de 51.000 pixels foi o menos representativo da área.

Esse parâmetro, quando não bem definido pode acabar gerando a omissão de pontos críticos de áreas de inundações e também a superestimação da mancha de inundação procurada.

Apesar das distorções, os mapas HAND finais encontrados foram satisfatórios para a realização da avaliação da suscetibilidade a inundação na cidade de São João do Rio do Peixe, comprovando como as características geomorfológicas da região possuem grande influência nos impactos causados por eventos de inundações.

Esses mapas podem servir de base para uma melhor organização do espaço urbano na região, diminuindo os impactos negativos resultantes dos eventos de inundações, e contribuindo de forma direta para a melhoria da qualidade de vida da população.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS (AESAs). **Precipitação pluviométrica anual (mm), de 1994 a 2019 para o município de São João do Rio do Peixe – PB**. Disp.: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/>>. Acesso em: 12 de abril de 2020
- ALVES, M.L.P.R. **Aplicação do modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) para análise de inundação na bacia hidrográfica do rio Cuiá, João Pessoa, Paraíba, Brasil**. João Pessoa, 2019. 53 p. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal da Paraíba.
- ASF. **ALOS PALSAR – About**. Estados Unidos, 2020. Disp. em: < <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>>.
- BUARQUE, D.C.; FAN, F.M.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 2, p. 91-103, 2009.
- CALDANA, N.F.S.; YADA JUNIOR, G.M.; MOURA, D.A.V.; COSTA, A.B.F.; CARAMORI, P.H. Ocorrências de alagamentos, enxurradas e inundações e a variabilidade pluviométrica na Bacia hidrográfica do Rio Iguaçú. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 343-355, 2018.
- CARDOSO, F.A.C.; PAULA, D.L.P.; VIEIRA, E.M. Caracterização fisiográfica da bacia do rio do peixe empregando SIG (Sistemas de Informações Geográficas). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, V. Belo Horizonte, 2014. **Anais...** Belo Horizonte: Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais.
- CPRM. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. **Diagnóstico do município de São João do Rio do Peixe, estado da Paraíba**. Recife: CPRM/PRODEEM, 34 p., 2005.
- CUARTAS, L.A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, A.D.; NOBRE, C.A.N.; HODNETT, M.G.; WATERLOO, M.J.; OLIVEIRA, S.M.; RANDOW, R.C.; TRANCOSO, R.; FERREIRA, M. 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. 462, p. 15-27, 2012.
- CUNHA, J.E.B.L.; RUFINO, I.A.A.; SILVA, B.B.; CHAVES, I.B. Dynamics of vegetal cover for São João do Rio do Peixe Basin (Paraíba) using remote sensing. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, p. 539-548, 2012.
- ESRI. **Esri Leverages Federal Open Data Policies**. Estados Unidos, 23 de setembro de 2014. Disp. em: <<https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>. Acesso em: 04 de março de 2020.
- FILGUEIRA, H.J.A. & BARBOSA, M.P.O Nordeste brasileiro: uma região de desastres socialmente construídos. In: GARCIA, J.P.M. (Org.). **Desastres na Paraíba: riscos, vulnerabilidade**

- e resiliência.** João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, p. 9-24, 2013.
- FILGUEIRA, H.J.A.; SILVA, T.C.; ROSENDO, E.E.Q. Estratégias de ação para a redução de risco de desastres por inundação, alagamento e movimento de massa em João Pessoa, Paraíba. In: **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012: volume Brasil.** Florianópolis: CEPED-UFGSC, 127 p., 2013.
- FILGUEIRA, H.J.A.; SILVA, T.C.; ROSENDO, E.E.Q. Estratégias de ação para a redução de risco de desastres por inundação, alagamento e movimento de massa em João Pessoa, Paraíba. In: CRUZ, D. D.; MIRANDA, G. E. C.; SOUZA, B. I. de; LUCENA, R. F. P. de. (Orgs.). **Meio ambiente e desenvolvimento: os desafios da sustentabilidade ambiental.** João Pessoa, PB: Editora UFPB, p. 157-169, 2019.
- FLORINSKY, I.V.; EILERS, R.G.; MANNING, G.R.; FULLER, L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modelling. **Environmental Modelling & Software**, v. 17, n 3, p 295-311, 2002.
- GOERL, R.F.; MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 1, p. 61-69, 2017.
- GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; SANTOS, S.S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, n. 2, p. 73-83, 2008.
- IBGE. **Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais.** Estimativas da população residente com data de referência 1º de julho de 2019. 2019.
- JUSTINO, L.E.L. **Análise da eficiência do dique de Cruz Do Espírito Santo (PB) por meio do modelo HAND.** João Pessoa, 2019. 61 p. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Civil) - Universidade Federal da Paraíba.
- MACÊDO, R.J.A. & SURYA, L. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno. **Revista Contexto Geográfico**, v. 3, n. 6, p. 47-55, 2018.
- MAPBIOMAS - Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil. **O que é MapBiomias.** Disp. em: <<https://mapbiomas.org/o-que-e-o-mapbiomas>>. Acesso em: 26 dezembro 2019.
- MEDEIROS, M.D. & ZANELLA, M.E. Estudo das Vazões e Estimativas de Inundações no Baixo-Açu-RN. **Geo UERJ**, n. 34, p. 1-30, 2019.
- 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. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n. 12, p. 231-253, 2017.
- 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.
- NEUMAN, G.; SILVEIRA, C.T.; SAMPAIO, T.V.M. Análise da influência da escala na obtenção dos atributos topográficos derivados de MDE. **RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 43, p. 179-199, 2018.
- NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C.D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.
- 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**, v. 30, n. 2, p. 320-333, 2016.
- PARAÍBA. Governo do Estado da Paraíba. Secretaria do Planejamento. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (PDRH/PB): Bacia do Rio do Peixe.** João Pessoa, 1996.
- PDRH. **Plano Diretor de recursos hídricos do estado da Paraíba PDRH/PB Bacia do Rio do Peixe.** SEMARH/SCIENTEC, 1996.
- PEREIRA, L.J.A. A problemática socioambiental na cidade de São João do Rio do Peixe – PB. Cajazeiras, 2009. 94 f. Monografia (Especialização em análise Geoambiental do Semiárido) – Universidade Federal de Campina Grande.
- PIRES, E.G. & BORMA, L.S. Utilização do modelo HAND para o mapeamento de bacias hidrográficas em ambiente de Cerrado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, Foz do Iguaçu. 2013. **Anais...**Foz do Iguaçu: INPE, 2013, p. 5568-5575.
- REIS, P.A. & SCHMIDT, M.A.R. Avaliação dos modelos HEC-RAS e GRASS na identificação de áreas vulneráveis a inundações em áreas urbanas. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 40, p. 115-126, 2017.
- RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terraforme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.
- RODRIGUES, G.O.; NOBRE, A.D.; SILVEIRA, A.C.; CUARTAS, L.A. Efeito 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. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XV. Curitiba, 2011. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011, p. 5769.
- SANTOS, C.L; SOUZA, A. S; VITAL, S. R. O.; GIRÃO, O.; WANDERLEY, L. S. A. Impactos da urbanização em bacias hidrográficas: o caso da Bacia do Rio Jaguaribe, cidade de João Pessoa/PB. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 1025-1033, 2016.
- SILVA, R.F; SANTOS, V.A.; GALDINO, S.M.G. Análise dos impactos ambientais da Urbanização sobre os recursos hídricos na sub-bacia do Córrego Vargem Grande em Montes Claros-MG. **Caderno de Geografia**, v. 26, n. 47, p. 966 – 978, 2016.
- SOUSA, A.R. **Análise das Inundações a partir de Atributos Hidro – Climatológicos e Ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe – PB.** Fortaleza, 2013. 158 p. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal do Ceará.
- SOUSA, T.M.I. **Avaliação da qualidade em redes de drenagem processadas a partir de modelos digitais de elevação.** João Pessoa, 2016. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba.
- TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas na América do Sul.** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 156 p., 2003.
- ZHANG, X.; HÖRMANN, G.; FOHRER, N.; GAO, J. Estimating the impacts and uncertainty of changing spatial input data resolutions on streamflow simulations in two basins. **Journal of Hydroinformatics**, v. 14, n. 4, p. 902-917, 2012.

Submetido em 7 de outubro de 2021
Aceito para publicação em 14 de fevereiro de 2022