



MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A INUNDAÇÃO COM O MODELO HAND E ANÁLISE DO SEU DESEMPENHO EM DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS

*Flood Hazard Mapping With HAND Model And Its Performance
Analysis Under Different Spatial Resolutions*

Roberto Fabris Goerl¹, Gean Paulo Michel² & Masato Kobiyama²

¹Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Campus de Curitibanos - Departamento de Ciências Naturais e Sociais
Rod. Ulysses Gaboardi, Km 3. CEP: 89.520-000, Curitibanos – Brasil
roberto.f.goerl@ufsc.br

²Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Instituto de Pesquisas Hidráulicas
Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia. CEP: 91501-970, Porto Alegre – Brasil
{gean.michel; masato.kobiyama}@ufrgs.br

RESUMO

Inundações são processos naturais, inerentes à dinâmica fluvial. Ao longo da história humana, este processo tem influenciado positivamente e negativamente a sociedade. Quando esta influência é negativa, ocorrem desastres hidrológicos. Uma das mais importantes medidas preventivas dos desastres hidrológicos é a identificação e mapeamento de áreas de susceptibilidade. O objetivo deste trabalho, portanto, foi testar a aplicabilidade do modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND) para o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações no município de Igrejinha-RS e avaliar a influência da área mínima de contribuição e da resolução do modelo digital de terreno (MDT) sobre o desempenho do HAND. Foi utilizado um MDT de 2,5 m o qual foi posteriormente reamostrado para as resoluções de 5 m, 10 m, 25 m e 50 m. Os mapas obtidos foram validados por meio da comparação com pontos amostrais em locais historicamente inundados. Os resultados da aplicação do HAND demonstraram bom ajuste espacial com as amostras de campo, mas grande sensibilidade a diferentes valores de área mínima de contribuição para iniciar um canal. Em relação à resolução espacial, o HAND foi menos sensível, apresentando diferença na área inundada com o MDT de 50 m. Os resultados obtidos afirmam o HAND é uma ferramenta útil para mapeamento de áreas susceptíveis à inundações, principalmente em locais onde há ausência de monitoramento hidrológico.

Palavras chave: Inundação, HAND, MDT, Município de Igrejinha.

ABSTRACT

Floods are natural processes and inherent in the fluvial dynamics. Throughout the human history, this process has influenced on the society positively and negatively. When this influence is negative, there is a hydrological disaster. One of the most important measures for hydrological disasters is the mapping of susceptible areas. The present study aimed to evaluate the applicability of the model Height Above the Nearest Drainage (HAND) for mapping the areas susceptible to flood in Igrejinha municipality, Rio Grande do Sul state, and to analyze the influence of the minimum contribution area and resolution of the digital terrain model area (DTM) on the model performance. A 2.5-m resolution of the DTM was initially used and then was resampled to different resolutions (5 m, 10 m, 25 m, and 50 m). The maps obtained with the HAND were validated through a comparison with the flood points which were surveyed in the field.

The HAND application results showed good spatial coherence with these field points and also a strong sensitivity to different values of the minimum contribution area for a channel initiation. In relation to the spatial resolution, the HAND was less sensitive, showing only a difference in the flooded area with a 50-m DTM. The obtained results permit to affirm that the HAND is a useful tool for mapping the areas susceptible to flood, especially in places where there is lack of hydrological monitoring.

Keywords: Flood, HAND, DTM, Igrejinha Municipality.

1. INTRODUÇÃO

Inundações são processos naturais, inerentes à dinâmica fluvial. Ao longo da história humana este processo contribuiu para o nascimento e desenvolvimento de diversas civilizações, como as que se instalaram ao longo dos rios Nilo, Eufrates, Tigre e Indo, utilizando-os como fonte de água e alimentos, transporte e rotas para comércio (MACKLIN & LEWIN, 2015). A história humana demonstra que as inundações têm influenciado positivamente e negativamente a sociedade. Quando esta influência é negativa, tem-se um desastre hidrológico. Nas últimas décadas, o número de pessoas que sofreram danos e prejuízos devido às inundações tem aumentado significativamente. Segundo o Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT, 2015), entre 1900 e 2015, as inundações afetaram cerca de 3,6 bilhões de pessoas, ocasionando a morte de aproximadamente sete milhões.

O crescimento populacional dos últimos anos tem aumentado, em escala global, o número de pessoas expostas aos fenômenos naturais extremos, como as inundações. Há uma forte relação entre o crescimento populacional e o aumento do número de desastres naturais (GOERL & KOBAYAMA, 2013), como, por exemplo, o caso do município de Joinville-SC (SILVEIRA *et al.*, 2009). Historicamente a sociedade se instalou próxima aos rios, e ali permanece e continua a se desenvolver. Assim, evitar a ocorrência de um desastre hidrológico é uma tarefa difícil, sendo, portanto, necessárias medidas preventivas e mitigadoras. Estas medidas podem ser classificadas em estruturais (obras) e não estruturais (mapeamento, sistema de alerta, e educação ambiental). As não estruturais se destacam pelo baixo custo e relativa facilidade de implementação (KOBAYAMA *et al.*, 2006).

Dentre tais medidas, o mapeamento de áreas susceptíveis a perigos naturais é uma das ferramentas mais viável, pois pode ser aplicada em municípios com poucos recursos

(SHIDAWARA, 1999) e visam suprir uma das maiores deficiências relacionadas aos desastres hidrológicos no Brasil, que é a falta de sistemas de alerta em escala local (KOBAYAMA *et al.*, 2006, KOBAYAMA & GOERL, 2007).

Tradicionalmente, utilizam-se para o mapeamento de áreas de inundação modelos hidrológicos e/ou hidrodinâmicos, os quais requerem dados hidrológicos (chuva e vazão) e topográficos (seção do canal e topografia da planície de inundação) (GALI *et al.*, 2007; MONTEIRO & KOBAYAMA, 2013). Além disso, quanto menor e mais montanhosa a bacia, melhor deve ser a resolução temporal e espacial destes dados. Contudo, no Brasil, o monitoramento hidrológico tem enfatizado as bacias grandes e médias (TUCCI & MENDES, 2006).

Nos últimos anos, têm se tornado disponíveis dados topográficos em maior quantidade e com melhor qualidade. JPL/NASA (2014) informou que estaria disponível a partir do ano de 2015 o Modelo Digital de Elevação em escala global, com resolução de 30 m, elaborado pelo Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (FARR *et al.*, 2007), cuja resolução espacial anteriormente disponível para todo o globo era de 90 m. Paralelamente, a maior disponibilidade tecnológica para coleta de dados topográficos (GNSS, SAR e LiDAR) tem auxiliado no detalhamento da superfície e elaboração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Superfície (MDS) de alta resolução (MANFREDA *et al.*, 2011). Assim, uma das lacunas para o mapeamento de áreas propensas à inundação, que era a representação detalhada do relevo, vem sendo suprida, visto que os dados topográficos e a representação acurada do relevo são um dos fatores mais importantes ao se determinar a altura e extensão da inundação (FEMA, 2009).

O uso de MDT para extração e análise de parâmetros hidrológicos e geomorfológicos não é recente, por exemplo, Beven e Kirkby (1979)

e Moore *et al.* (1991). Além disso, o seu uso para o mapeamento de inundação, suprimindo a falta de dados hidrológicos, tem se tornado mais frequente (DEGIORGIS *et al.*, 2012; JALAYER *et al.*, 2014; POURALI *et al.*, 2016).

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo aplicar o modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND), proposto por RENNO *et al.* (2008) e NOBRE *et al.* (2011) para mapear áreas susceptíveis a inundação no município de Igrejinha-RS, e avaliar a influência da resolução do MDT sobre o seu desempenho.

O modelo HAND já foi aplicado por Gharari *et al.* (2011) para classificação hidrológica da paisagem (banhado, encosta e topo de morro). Nobre *et al.* (2011) utilizaram o HAND para mapeamento e análise espacial de algumas características hidrológicas dos solos na Amazônia. Alfaya *et al.* (2013) utilizaram mineração de dados em conjunto com o HAND para o mapeamento de áreas alagadas na planície fluvial do rio Amazonas. Silva *et al.* (2013) mapearam áreas susceptíveis a inundação da bacia do rio Paraíba do Sul, comparando as classes do HAND com áreas inundáveis para diferentes tempos de retorno obtidos por meio do modelo HEC-HMS. Nobre *et al.* (2016) aplicaram o HAND para mapeamento de inundação no município de Blumenau, comparando-o com um evento ocorrido em 2011.

Ainda existe uma lacuna relacionada à trabalhos que analisaram o desempenho do HAND em função da variação da resolução espacial e apenas Nobre *et al.* (2015) utilizaram um MDT de alta resolução. Os demais estudos utilizaram dados oriundos do SRTM. Informações sobre o funcionamento do HAND foram detalhadas por Rennó *et al.* (2008).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho avaliou o desempenho do HAND para o mapeamento de áreas susceptíveis a inundação, analisando o seu desempenho em relação a diferentes resoluções do MDT e discutiu como a área de contribuições influencia nos resultados do modelo.

2.1 Área de Estudo

O presente trabalho aplicou o modelo HAND no município de Igrejinha -RS (Figura 1), onde a ocorrência de inundações é frequente.

Segundo Prefeitura Municipal de Igrejinha (2015), o município possui aproximadamente 32 mil habitantes e seu território é de 136 km². O clima é subtropical úmido e as altitudes variam entre 22 m e 773 m. Conforme Oliveira *et al.* (2013), as inundações frequentemente causam danos aos municípios que se desenvolveram nas planícies e terraços fluviais do vale do rio Paranhana, entre eles Igrejinha. Um dos episódios mais severos neste município ocorreu em junho de 1982, que ocasionou mortes, desabrigados e um significativo impacto econômico na região. Estes autores relatam que, entre 2005 e 2010, houve um expressivo aumento de construções residenciais nas áreas frequentemente inundáveis na zona urbana do município de Igrejinha.

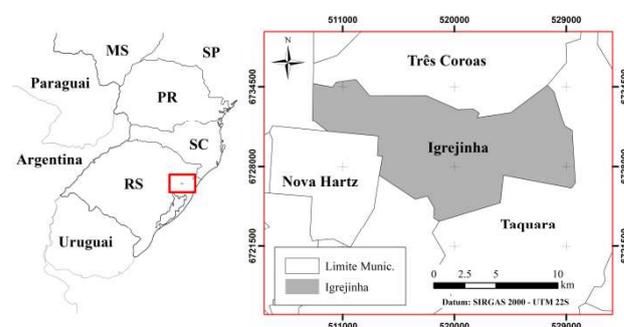


Fig. 1 – Localização do município de Igrejinha-RS.

2.2 Dados topográficos e de inundação

Para a elaboração do mapa das áreas susceptíveis a inundação utilizou-se um MDT com resolução de 2,5 m, disponibilizado pelo Serviço Geológico Brasileiro (CPRM), elaborado em ocasião do projeto Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações: 1:25.000. Este MDT abrange a área do município e um buffer de 1 km e foi gerado pela BRADAR por interferometria de dados de Radar de Abertura Sintética na banda P (CPRM, 2015).

Para as avaliações do mapa de inundação e do desempenho do modelo HAND, foram utilizados dados de Oliveira *et al.* (2013), que mapearam 76 pontos de inundação na área urbana do município, a partir de dados de campo, por meio de notícias de jornal e por dados fornecidos pela defesa civil. Estes pontos correspondem aos locais historicamente inundados, e não apenas a um evento específico.

2.3 Aplicação do modelo HAND

O HAND normaliza o MDT com base na diferença entre a altitude do terreno e a altitude do canal de drenagem mais próximo. Quanto mais próximo de um canal um local estiver e também quanto menor a variação altimétrica entre o canal e este local, maior a suscetibilidade do mesmo às inundações.

Como qualquer outra característica hidrogeomorfológica obtida pela topografia, os resultados do HAND estão condicionados pela qualidade e resolução do MDT (ZHANG & MONTGOMERY, 1994), visto que este é uma das principais variáveis de entrada do modelo.

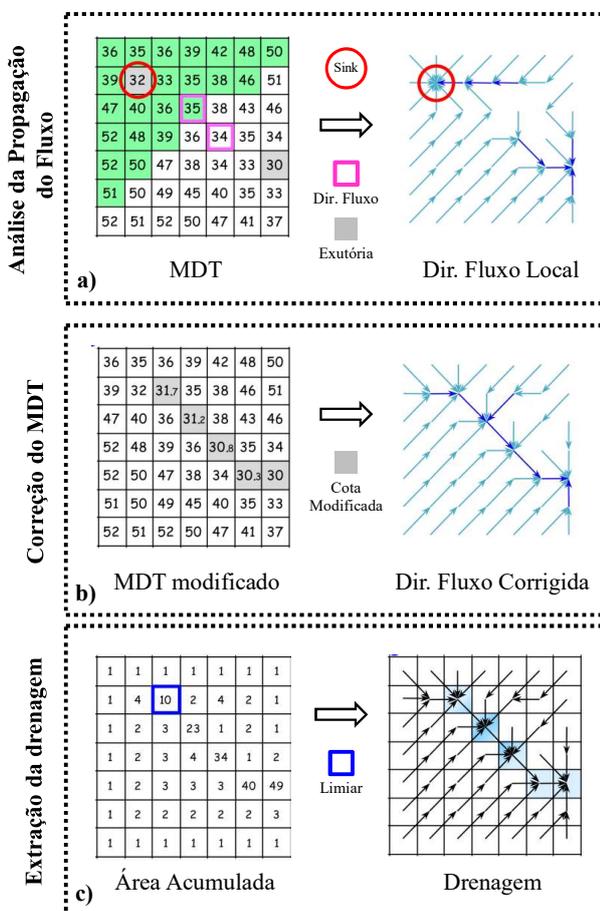


Fig. 2 – Etapas para a consistência hidrológica do MDT: (a) consistência hidrológica; (b) determinação da direção de fluxo; (c) extração da rede de drenagem (Fonte: Nobre *et al.*, 2011).

Dentro do modelo HAND, a primeira etapa é a correção hidrológica do MDT, eliminando os sinks (Figura 2a), para garantir a propagação do fluxo em todas as células do MDT (Figura 2b). Posteriormente, a direção e a área de acumulação de fluxo de cada célula são determinadas.

Estabelecendo um limiar mínimo para iniciar um canal (MONTGOMERY & DIETRICH, 1988), a rede de drenagem é extraída do MDT (Figura 2c). Quanto menor o limiar, maior a densidade de drenagem.

A segunda etapa do modelo HAND é a normalização da altimetria com base nas cotas da drenagem. Assim, o MDT é reclassificado com base na diferença entre a cota do canal mais próximo e as cotas da planície de inundação e/ou das encostas adjacentes a este canal (Figura 3). No presente trabalho foi utilizada a versão do HAND implementada no TerraHidro.

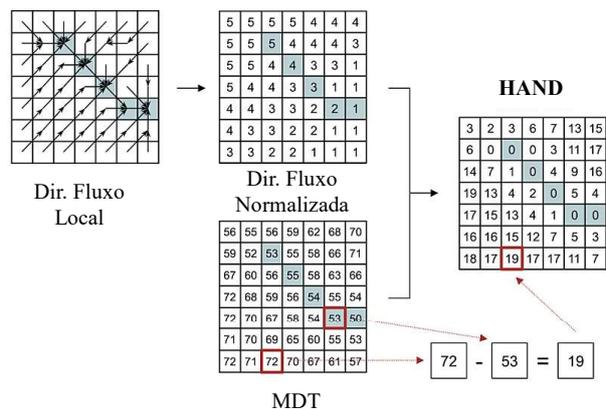


Fig. 3 – Normalização do MDT por meio do HAND. (Fonte: Rennó *et al.*, 2008).

A reclassificação dos resultados do HAND para gerar o mapa final de inundação foi feita com base nos pontos de ocorrência de inundação, apresentados por Oliveira *et al.* (2013). Assim, determinaram-se três classes de susceptibilidade: alta, média, baixa.

Após a reclassificação, foi analisada a sensibilidade do HAND em relação a dois parâmetros: (i) área mínima para iniciar um canal e (ii) resolução do MDT. Foram testados 10 valores diferentes de área mínima para iniciar o canal, variando entre 0,156 km² até 18,75 km². Nesta etapa foi utilizado apenas o MDT de 2,5 m.

Para testar a sensibilidade em relação à resolução espacial, o MDT de 2,5 m foi reamostrado para 5 m, 10 m, 25 m e 50 m utilizando a ferramenta resample do ArcGIS, e o algoritmo Bilinear, que determina o valor de uma nova célula com base na média ponderada pela distância dos quatro vizinhos mais próximos (ESRI, 2015). Esta etapa foi realizada após a

calibração espacial do HAND, ou seja, após a determinação de um limiar de fatiamento do modelo e estabelecimento das classes de susceptibilidade de inundação.

Resultados e discussão

O primeiro passo para que o resultado do HAND tenha uma aplicação prática é a sua reclassificação. Rennó *et al.* (2008) e Nobre *et al.* (2011) propuseram quatro classes para o fatiamento dos resultados do HAND. Silva *et al.* (2013) propuseram, com pequenas modificações da classificação original, quatro limiares para o HAND: Alagamento (até 5 m); Ecótono (de 5 m a 15 m); Encostas (de 15 m a 50 m); e Topos de morro (maior que 50 m). Inicialmente, o presente trabalho considerou a área de alagamento (waterlogged) como área susceptível à inundação. Então, ao adotar 5 m como limiar de fatiamento para as áreas de inundação, 78% dos pontos de campo, apresentados por Oliveira *et al.* (2013), estariam incluídos nesta área. Contudo, haveria uma generalização de áreas susceptíveis à inundação em Igrejinha, resultado do valor inicial baixo adotado para a área de contribuição (Figura 4 – Ac: 0,15 km²), o que não teria um caráter prático de prevenção, pois o HAND estaria acertando muito, mas também errando muito.

Para gerar uma área de inundação representativa, foi adotado um valor para área de contribuição que contemplasse o máximo dos pontos de campo, mas simultaneamente reduzindo ao máximo a área susceptível, permanecendo apenas as áreas de inundação ao longo do rio principal, ou seja, rio Paranhana. Assim, foi adotado o limiar de 5,5 m, que coincide com 90% dos pontos de Oliveira *et al.* (2013), associado à área de contribuição de 18,75 km².

Nota-se que há uma considerável diminuição da área de inundação em função do aumento da área mínima para iniciar um canal (Figura 5). Adotando estas condições de limiar e de área de contribuição, considerou-se o HAND calibrado.

Para classificar a área inundada em alta, média e baixa susceptibilidade, o presente trabalho adotou três faixas de valores, variando de 0 m a 5,5 m (Figura 6). Os valores acima de 5,5 m foram classificados como não susceptíveis à inundação.

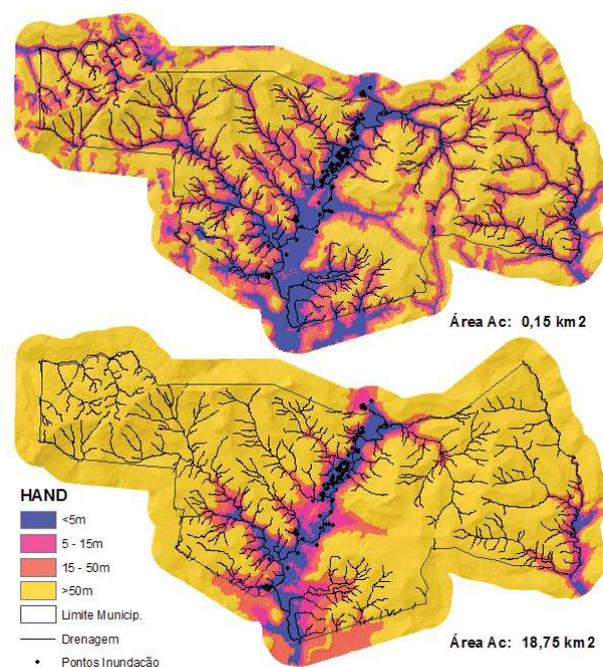


Fig. 4 – Variação espacial das classes do HAND em função da densidade de drenagem.

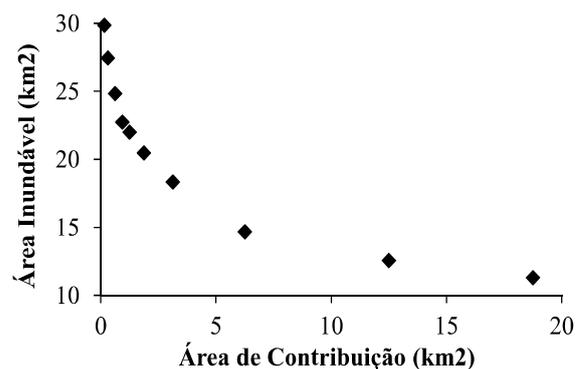


Fig. 5 – Relação entre a variação das áreas mínimas para iniciar um canal e as áreas inundáveis determinadas com HAND = 5,5 m.

O princípio de funcionamento do modelo HAND é a determinação da variação altimétrica entre o canal e as células adjacentes, levando também em conta a distância entre a célula e o canal. Quanto menor a variação altimétrica entre uma célula e o canal e quanto mais próximo de um canal, maior a susceptibilidade à inundação. Assim, as áreas de menor amplitude altimétrica em relação ao rio principal foram classificadas como alta susceptibilidade. Ao norte da área inundada, uma possível área de avulsão, na parte interna do meandro, também foi enquadrada na classe alta (Figura 6).

Nota-se que há locais classificados como susceptíveis onde não há uma coincidência com os pontos de Oliveira *et al.* (2013). Isto pode

ser observado em um vale na porção leste, que foi classificado como susceptível a inundação, mas não há registros de campo. Contudo, não se pode concluir se existe inconsistência nos resultados do HAND ou na falta de dados de campo.

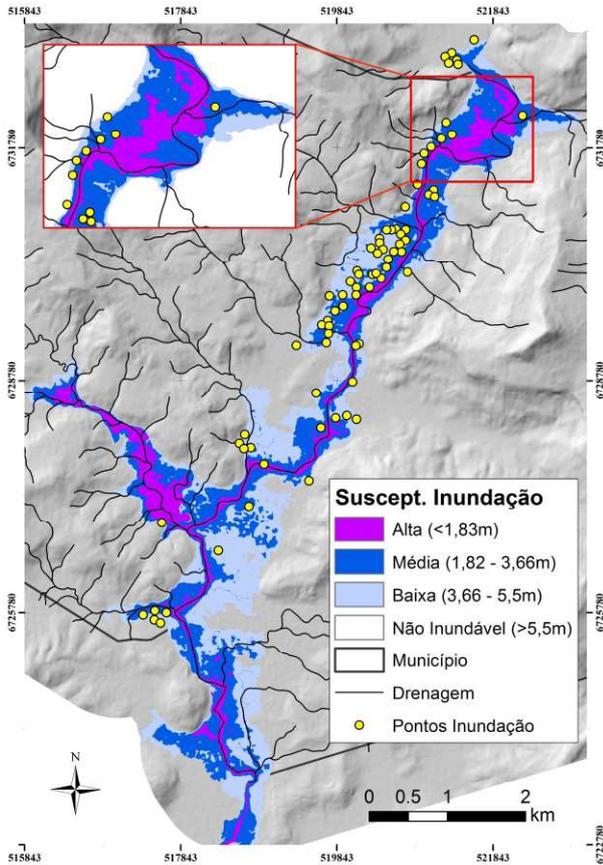


Fig. 6 – Mapa de susceptibilidade a inundação para o município de Igrejinha.

Nota-se também que muitas áreas de média suscetibilidade ficaram fragmentadas. Devido ao método de obtenção do MDT (SAR), muitos ruídos provenientes da área urbana foram repassados ao MDT, gerando rugosidades que são mais evidentes na planície de inundação, resultando em locais onde a classe de média suscetibilidade apresenta células isoladas. Ressalta-se que até este ponto do trabalho, foi utilizado o MDT de resolução de 2,5 m.

Em relação a variação da resolução (Figura 7) do MDT, de 2,5 m até 50 m, não houve diferença significativa da área total inundada, ocorrendo um aumento de apenas 0,83 km² do MDT de 2,5 m para o de 50 m. Houve uma diminuição da área total inundada do MDT de 25 m em relação aos MDTs de 5 m e 10 m. Essa

variação pode estar associada à suavização da topografia próxima ao canal e das rugosidades/ruídos. Nota-se também pouca variação da área susceptível em cada classe em função da variação da resolução, havendo uma significativa alteração apenas nos MDTs de 25 m e 50 m.

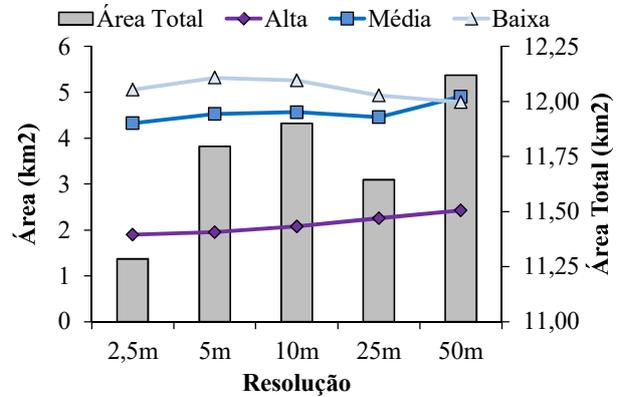


Fig. 7 – Variação das áreas susceptíveis a inundação em função da resolução do MDT.

Realizando uma correlação espacial entre os pontos de inundação apresentados por Oliveira *et al.* (2013) e os valores do HAND para MDTs de diferentes resoluções observa-se que independente da resolução, mais de 75% dos pontos ficaram enquadrados em uma das três classes de susceptibilidade (Figura 8). Devido à suavização do relevo no MDT de 50 m, os pontos nesta resolução apresentaram menor variação em termos de distribuição de valores. Ressalta-se que os MDTs de diferentes resolução foram elaborados a partir de um dado topográfico detalhado (2,5 m). Outras análises necessitam ser realizadas utilizando dados brutos em escalas menores, como os do SRTM.

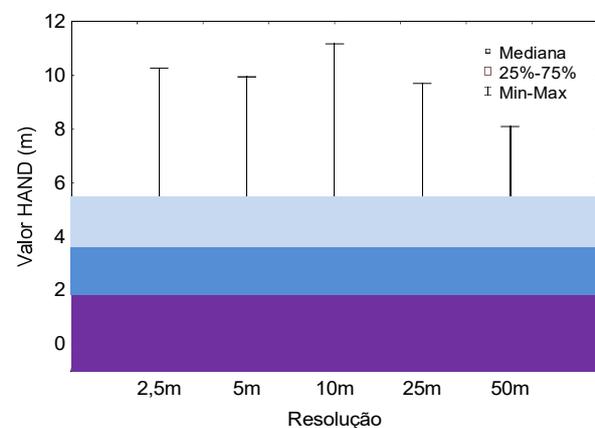


Fig. 8 – Valores do HAND com diferentes resoluções para os pontos de inundação.

Atualmente MDTs de alta resolução têm se tornado mais acessíveis. Contudo, em muitos locais no Brasil as bases cartográficas disponíveis ainda estão em escalas regionais, ou seja, 1:100.000 e 1:250.000, o que poderia resultar em uma representação topográfica sem detalhes e MDTs com resoluções maiores (20 m e 50 m, respectivamente). A área propensa a inundação em cada resolução, estabelecida pelo limiar do HAND de 5,5 m permaneceu semelhante para as diferentes classe de susceptibilidade (alta, média e baixa), como comentado anteriormente e apresentado na Figura 7. Porém, em relação ao mapa de susceptibilidade houve diferenças (Figura 9).

As classes alta e média na resolução de 50 m ficaram grosseiramente delineadas. Essa aparente mudança pode não comprometer o resultado geral, ou seja, a área máxima inundável. Contudo, tratando-se de zoneamento, medidas preventivas necessitam ser mais efetivas em áreas de média e alta susceptibilidade. Dessa maneira, o uso de MDTs com resoluções menos detalhadas poderiam comprometer medidas preventivas e/ou locais prioritários para alertas. Além disso, a alternância de um classe para a outra poderia implicar na desvalorização do preço de um lote, ou ainda dar uma falsa sensação de segurança.

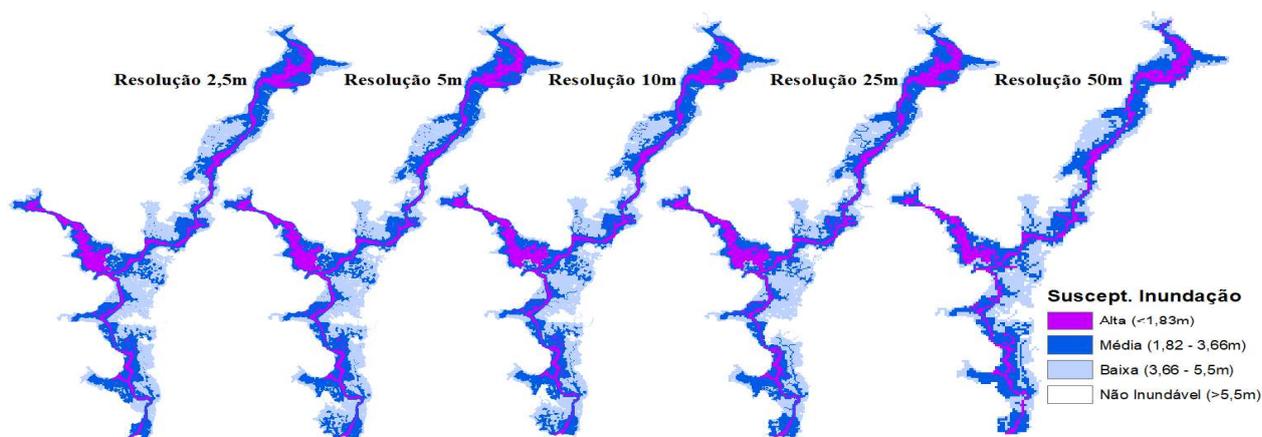


Fig. 9 – Comparação entre o resultado do HAND para cinco diferentes resoluções de MDT.

CONCLUSÕES

O presente trabalho testou a eficiência do modelo HAND para o mapeamento de áreas susceptíveis a inundação, o qual utiliza como principal dado de entrada o MDT. Este modelo foi aplicado ao município de Igrejinha-RS, onde as inundações são frequentes. Foi analisada a sensibilidade do modelo em relação à variação da área mínima para iniciar um canal bem como à variação da resolução espacial do MDT. O HAND se mostrou muito sensível em relação à variação da área mínima necessária para iniciar um canal. Quanto menor esta área, maior a quantidade de locais classificados como susceptíveis a inundação. Por outro lado, o HAND se mostrou pouco sensível à variação da resolução do MDT. Apenas na resolução de 50 m houve considerável mudança do delineamento das áreas de inundação.

O mapa de inundação gerado pelo HAND mostrou boa correlação espacial com pontos que

historicamente têm sofrido com as inundações, o que indica que o HAND é uma ferramenta promissora em mapeamentos aplicados a inundação, especialmente em locais onde há falta de dados hidrológicos. Contudo, há ainda uma incerteza na delimitação das classes de susceptibilidade, sendo que as mesmas necessitam dados de campo ou registros históricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFAYA, F.A.V.S.; REIS, M.S.; FLORENZANO, T.G.; BARBOSA, C.C.F. Classificação de áreas alagáveis da planície do rio Amazonas utilizando mineração de dados e GEOBIA. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. São José dos Campos: Inpe. p. 2306 – 2313, 2013.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Journal**, v.

24, n. 1, p. 43-69, 1979.

CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Igrejinha** – RS. Brasília, 2015. Escala: 1:40.000.

DEGIORGIS, M.; GNECCO, G.; GORNI, S.; ROTH, G.; SANGUINETI, M.; TARAMASSO, A.C. Classifiers for the detection of flood-prone areas using remote sensed elevation data. **Journal of Hydrology**, v. 470-471, p. 302-315, 2012.

EM-DAT. **Banco Internacional de Desastres**. 2015. Disponível em: <<http://www.emdat.be/>>. Acesso em: 25 set. 2015

ESRI. **Cell size and resampling in analysis**. 2015. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/>>. Acesso em: 20 set. 2015

FARR, T.G.; ROSEN, P.A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.T.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, p. 1-33, 2007.

FEMA – Federal Emergency Management Agency. **Mapping the Zone: Improving Flood Map Accuracy**. Washington, DC: National Academies Press, 2009. 122 p.

GALI, M.; BORUFF, B.J.; CUTTER, S.L. Assessing flood hazard zones in the absence of digital floodplain maps: comparison of alternative approaches. **Natural Hazards Review**, v. 8, p. 1-12, 2007.

GHARARI, S.; HRACHOWITZ, M.; FENICIA, F.; SAVENIJE, H.H.G. Hydrological landscape classification: investigating the performance of HAND based landscape classifications in a central European meso-scale catchment. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 15, p. 3275-3291, 2011.

GOERL, R.; KOBAYAMA, M. Redução dos desastres naturais: desafio dos geógrafos. **Ambiência(Online)**, v. 9, p. 145-172, 2013.

JALAYER, F.; RISI, R.; PAOLA, F.; GIUGNI, M.; MANFREDI, G.; GASPARINI, P.; TOPA,

M.E.; YONAS, N.; YESHITELA, K.; NEBEBE, A.; CAVAN, G.; LINDLEY, S.; PRINTZ, A.; RENNER, F. Probabilistic GIS-based method for delineation of urban flooding risk hotspots. **Natural Hazards**, v. 73, n. 2, p. 975-1001, 2014.

JPL/NASA.U.S. Releases Enhanced Shuttle Land Elevation Data. Publicado em 23 set 2014. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 26 set. 2015

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F. Quantitative method to distinguish flood and flash flood as disasters. **SUISUI Hydrological Research Letters**, v.1, p.11-14, 2007.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D.A.; MARCELINO, I.P.V.O.; MARCELINO, E.V.; GONÇALVES, E.F.; BRAZETTI, L.L.P.; GOERL, R.F.; MOLLERI, G.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais: Conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

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

MANFREDA, S.; DI LEO, M.; SOLE, A. Detection of Flood-Prone Areas Using Digital Elevation Models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, p. 781-790, 2011.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **REGA**, v.10, p 13-25, 2013.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, v. 336, n. 6196, p. 232-234, 1988.

MOORE, I.D., GRAYSON, R.B., LADSON, A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p.3-30, 1991.

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.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M. G.; 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, p. 13-29, 2011.
- OLIVEIRA, G.G.; QUEVEDO, R.P.; GUASSELLI, L.A.; MENEZES, P.H.N. Expansão urbana nas áreas inundáveis do rio Paranhana no município de Igrejinha/RS. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. São José dos Campos: Inpe. p. 920 – 927, 2013.
- POURALI, S.H.; ARROWSMITH, C.; CHRISMAN, N.; MATKAN, A.A.; MITCHELL, D. Topography wetness index application in flood-risk-based land use planning. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 9, n. 1, p. 39-54, 2016.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE IGREJINHA. **Informações gerais**. Disponível em: <<http://www.igrejinha.rs.gov.br/>>. Acesso em: 28 set. 2015
- RENNÓ, C. D.; 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**, v. 112, p. 3469-3481, 2008.
- SHIDAWARA. M. Flood hazard map distribution. **Urban Water**, v.1, p.125-129, 1999.
- SILVA, W.F.; MOLLERI, G.S.F.; PINTO, M.B.P, ARAÚJO JUNIOR, G.J.L.D. Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias. In: **Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. São José dos Campos: Inpe. p. 7001-7008, 2013.
- SILVEIRA, W.N.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R.F.; BRANDENBURG, B. **História de Inundações em Joinville 1851 - 2008**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 2009. 153p.
- TUCCI, C.E.M.; MENDES, C.A. **Avaliação Ambiental Integrada de Bacia Hidrográfica**. PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento Projeto PNUD 00/20 – Apoio às Políticas Públicas na Área de Gestão e Controle Ambiental – SQA, 2006. 319p.
- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D.R.: Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulation, **Water Resources Research**, v. 30, p.1019-1028, 1994.