

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# COMPARAÇÃO DO MAPA DE INUNDAÇÃO ENTRE DOIS MODELOS DIGITAIS DE DIFERENTES RESOLUÇÕES EM UMA COMUNIDADE RURAL EM SANTA CATARINA

*Itzayana González-Ávila<sup>1</sup>; Alessandro Gustavo Franck<sup>2</sup>; João Gabriel Maciel<sup>3</sup>; Masato Kobiyama<sup>4</sup>; Daniel Jato-Espino<sup>5</sup>*

**Resumo:** Desastres naturais acontecem devido a interação entre os sistemas humanos e os fenômenos naturais. O mapeamento de áreas suscetíveis, como medida não estrutural, auxilia na redução do risco de desastres. Modelos topográficos são um insumo confiável de dados para elaboração de mapas de inundação. Os resultados das simulações devem ser verificados e validados em conjunto com as comunidades locais para as quais são elaborados, buscando um enfoque de mapeamento participativo. O presente trabalho tem como objetivo comparar dois modelos topográficos de inundação, obtidos a partir de dois Modelos Digitais de Elevação (MDE) com diferentes resoluções espaciais, mediante o modelo *Height Above the Nearest Drainage* – HAND, para uma comunidade rural. A área de estudo é a comunidade Mãe dos Homens no estado de Santa Catarina, a qual participou previamente de entrevistas associadas a percepção de risco de desastres. Identificou-se que, embora os resultados de mapeamento de inundação para os dois MDEs resultem em classificações de áreas suscetíveis a inundação semelhantes, deve-se atentar para uma análise mais cuidadosa. A distribuição das áreas classificadas depende do insumo digital utilizado, e pode influenciar no desenvolvimento de estratégias de gestão do risco.

**Palavras-Chave** – HAND; MDE, Mapeamento Participativo.

## INTRODUÇÃO

Quando fenômenos naturais (inundações, deslizamentos, terremotos, etc) causam prejuízos em comunidades, caracterizamos tais eventos como desastres naturais (Kobiyama & Zanandrea, 2023). O fenômeno conhecido como inundação, é um transbordamento de água de um corpo hídrico para fora da sua calha normal de modo a cobrir áreas que normalmente não são alagadas (Castro, 1998), e que podem estar habitadas por comunidades. Embora a ocupação de planícies de inundação é uma problemática de gestão do território, há uma forte tendência em responsabilizar às mudanças climáticas pelos desastres.

Devido à ocupação desordenada de planícies de inundação, combinado a ocorrência de eventos extremos, diversas medidas devem ser adotadas com finalidade de reduzir o risco associado a ocorrência de desastres naturais. Dentre as medidas existentes, se destacam as medidas não estruturais, como o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação. A presente pesquisa salienta o auxílio destes mapas no planejamento territorial uma vez que reduz futuros prejuízos humanos e econômicos decorrentes destes desastres (Pinheiro e Severo, 2023).

Na elaboração de mapas de suscetibilidade a inundações podem ser empregados modelos como o *Height Above the Nearest Drainage* – HAND proposto por Rennó *et al.*, 2008 e Nobre *et*

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. GPDEN- IPH. Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. [gonzalez.avila@ufrgs.br](mailto:gonzalez.avila@ufrgs.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. GPDEN- IPH. Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. [alessandro.franck@ufrgs.br](mailto:alessandro.franck@ufrgs.br)

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. GPDEN- IPH. Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. [maaciel2016@gmail.com](mailto:maaciel2016@gmail.com)

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul. GPDEN- IPH. Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil. [masato.kobiyama@ufrgs.br](mailto:masato.kobiyama@ufrgs.br)

<sup>5</sup>Universidad Internacional de Valencia. GREENIUS. C. del Pintor Sorolla, 21 . Valencia, España. [djato@universidadviu.com](mailto:djato@universidadviu.com)

*al.*, 2011, o qual é um modelo topográfico simples que consegue representar manchas de inundação em lugares em que não há suficiente monitoramento hidrológico, já que baseia-se em um MDE como dado principal de entrada (Goerl *et al.*, 2017; Vasconcellos *et al.*, 2021). O HAND assim como outros modelos topográficos tem sido utilizado principalmente em áreas urbanas para simular inundações (Muthusamy *et al.*, 2021; Xafoulis *et al.*, 2023), o que reflete a necessidade de realizar mais estudos de mapeamento de inundação em regiões rurais, com o objetivo de propor um melhor planejamento territorial.

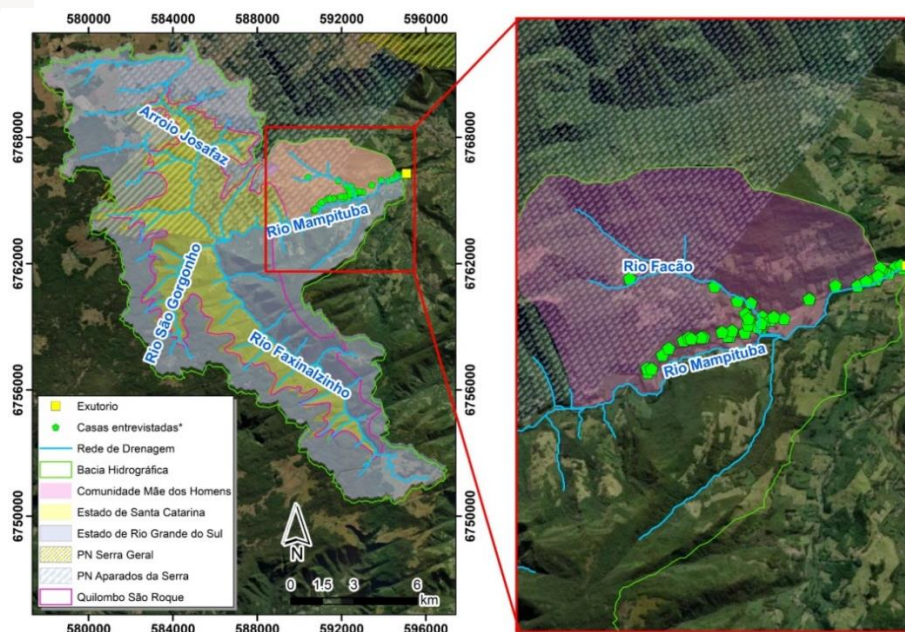
Zambrano *et al.* (2020) demonstraram significativo efeito da qualidade e resolução de MDE sobre mapeamento de áreas de inundação com o modelo hidrodinâmico e LISFLOOD-FP (Bates *et al.*, 2010). Considerando que o MDE é o único dado de entrada do HAND, a qualidade do MDE pode ainda mais influenciar a qualidade do mapa, conseqüentemente sendo requisitada a melhor possível (Xu *et al.*, 2021). A modelagem como ferramenta para representar diversas cenas de um fenômeno precisa ser calibrada e validada. Nesse sentido, o reconhecimento da área de estudo mediante trabalho de campo deve ser fundamental para que se possam verificar inconsistências no resultado do modelo. O enfoque participativo no mapeamento de áreas suscetíveis ajuda a estabelecer melhores estratégias de redução do risco (McCall, 2008). Por isso, trabalhos conjuntos entre processos computacionais e diálogos interativos com as comunidades locais são de extrema importância na gestão do risco de desastres.

No Brasil, muitas regiões não possuem MDEs de alta resolução disponíveis, embora o acesso a tais dados com maior nível de detalhamento seja cada vez mais comum. Por esse motivo, o presente estudo tem como objetivo comparar dois modelos topográficos de inundação obtidos a partir de dois MDEs com diferentes resoluções espaciais. Espera-se com este estudo auxiliar na análise das diferenças e limitações do uso dos MDEs e avaliar os resultados do HAND para representação das manchas de inundação em uma comunidade rural.

## ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, localizada em uma das cabeceiras da bacia hidrográfica do rio Mampituba, compreende a comunidade rural Mãe dos Homens com uma área de 16 km<sup>2</sup>. A região alvo desse estudo fica as margens do rio Mampituba e de seu tributário o rio Falcão, em um trecho da bacia que abrange os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, denominada como Bacia Hidrográfica na **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, com uma área de aproximadamente 194 km<sup>2</sup>.

Figura 1 – Area de estudo



O clima na região é classificado como Cfa de acordo com a Köppen e Geiger, com 18,8 °C sendo a temperatura média. A média anual de pluviosidade é de 2503 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, com uma média de 328 mm.

Em relação a geomorfologia, na área se identificam algumas unidades como Planalto, Encosta e Planície de Inundação (González-Ávila et al., 2022). Considerando as diferentes comunidades ali assentadas, tais unidades podem ser descritas através de unidades sociogeomofológicas (González-Ávila et al., 2023b).

A ;**Error! No se encuentra el origen de la referencia.** demonstra os locais em que foram realizadas entrevistas à comunidade Mãe dos Homens com o intuito de avaliar a percepção de perigo da mesma (Carvalho et al., 2023; González-Ávila et al., 2023a), informação que foi útil para validação do modelo utilizado no presente trabalho conforme descrito na metodologia.

## METODOLOGIA

### Dados topográficos

Para a presente análise, foram utilizados dois MDEs: i) *Advanced Land Observing Satellite (ALOS)*, sensor *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR)* - (<https://search.asf.alaska.edu/>), com resolução espacial de 12 m; e ii) um MDE da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS), obtido através de um Levantamento Aerofotogramétrico - (<http://sigsc.sc.gov.br/>), com resolução espacial de 1 m.

A rede de drenagem foi gerada com os mesmos critérios para cada MDE (12 m e 1 m) utilizando ferramentas do *software* ArcGIS 10.5, com o qual foram realizados o processamento de informações geográficas e a geração de mapas

### Modelo HAND

Foi utilizado o modelo topográfico HAND para identificação de áreas suscetíveis à inundação. O modelo representa como áreas de maior suscetibilidade a inundação, aquelas regiões que estão perto de um canal e com uma variação altimétrica menor entre o canal próximo e o local avaliado. Para tal, os dois MDE acima mencionados foram utilizados como dado de entrada. Foram utilizados o *software* QGIS e a ferramenta PCRaster para o processamento e modelagem.

Para avaliação do resultado foram utilizados os dados obtidos a partir de entrevistas presenciais realizadas em 2022 na comunidade, bem como os registros gps das manchas de

inundação apontadas pelos moradores. Alguns dos resultados obtidos nessas entrevistas foram apresentados em Carvalho *et al.* (2023) e González-Ávila *et al.* (2023). Baseado nos resultados das entrevistas e conforme registros das manchas de inundação prévias foram estabelecidos intervalos de alta (0 – 2,33 m), meia (2,33 – 4,66 m) e baixa (4,66 – 7 m) suscetibilidade à inundação para a área de estudo. Valores acima de 7 m foram classificados como não susceptíveis a inundação conforme o observado em campo e análise dos dados obtidos. Os pixels com valores maiores que 7 m foram removidos com as ferramentas *Logical* e *Set Null* do pacote *Spatial Analysis Tools* do ArcGis 10.5.

Para avaliar a diferença entre dois MDEs, foi usado o erro relativo entre as manchas de inundação obtidas com cada MDE:

$$ER = \frac{H1-H12}{H12} \quad (1)$$

onde ER é o erro relativo (adimensional); H1 e H12 são as profundidades de mancha (m), obtidas com o MDE de 1 m e 12 m, respectivamente.

A avaliação dos resultados se deu por meio da quantificação de área obtida em cada classe de suscetibilidade e mediante a comparação de métricas como desvio padrão, média de cada modelo e o erro relativo resultante da comparação entre os MDEs.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

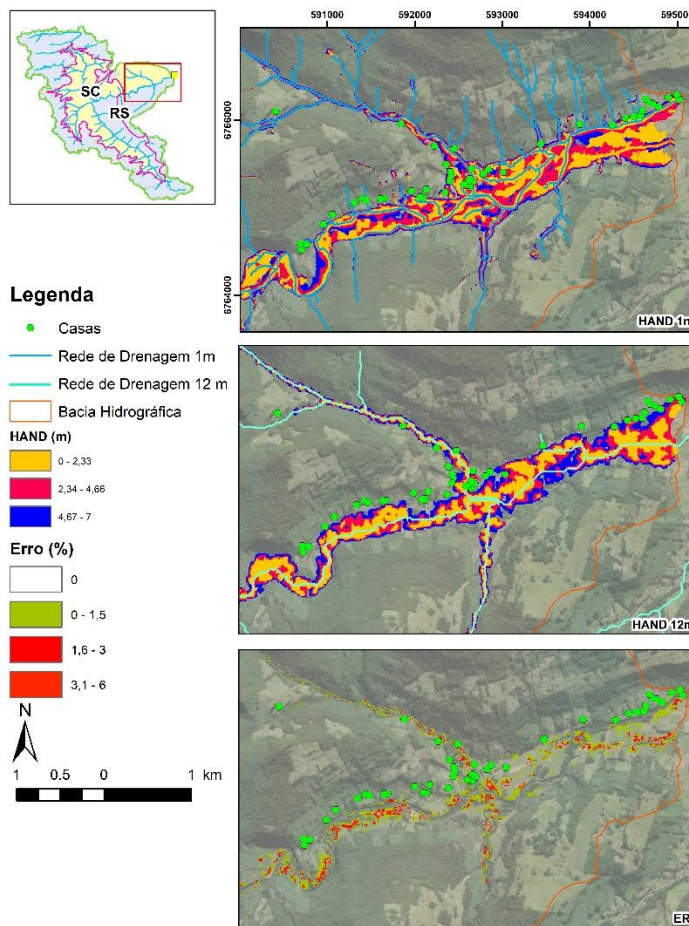
Analisando-se as redes de drenagem obtidas a partir dos diferentes MDEs foram identificadas divergências significativas. Por meio de entrevistas na comunidade Mãe dos Homens o grupo de trabalho identificou que o MDE de 1 m de resolução representa melhor o observado em campo. Os resultados diferentes se devem em princípio à resolução espacial e ao método de obtenção de cada MDE, em geral, malhas mais finas como a do modelo de 1 m podem fornecer resultados mais fiéis à realidade. Embora (Goerl *et al.*, 2017) comentaram que o MDE de 12 m de resolução é suficiente e apresenta um desempenho computacional melhor em bacias de maior tamanho o presente trabalho obteve que, para a análise espacial da comunidade Mãe dos Homens, o MDE de 1 m de resolução apresentou resultados mais fiéis a realidade, sendo assim, o mais adequado.

Considerando informações obtidas durante diálogo com a comunidade Mãe dos Homens, e a comparação entre os traçados das redes de drenagem obtidas, foram identificados alguns erros na rede de drenagem de 12 m, portanto, espera-se que o MDE esteja também com algumas falhas na representação do resultado final. A rede de drenagem do rio Facão apresenta fortes divergências no traçado se comparados os resultados derivados de cada MDE. Além disso, foram identificados pequenos tributários à rede de drenagem no HAND de 1 m o que ajuda a identificar possíveis rios efêmeros, possíveis locais de inundações bruscas e fluxos de detritos. (Nobre *et al.*, 2016) mencionaram que essas divergências devem ser consideradas nas análises espaciais, uma vez que a rede de drenagem atua como referência topográfica variável sobre a qual é gerado o modelo HAND.

A Figura 2 mostra as manchas de inundação obtidas pelo modelo HAND a partir dos MDE de 1 e 12 m de resolução espacial, bem como o cálculo do ER entre os dois mapas na comunidade Mãe dos Homens.

Figura 2– Mancha de inundação HAND 1 m e 12 m, na comunidade Mãe dos Homens.





Analisando visualmente a Figura 2, as áreas suscetíveis a inundações do HAND 1 m parecem ter predominância para áreas alta e medianamente suscetíveis a inundações (cor amarela e rosa), já para a mancha de inundações HAND 12 m as áreas dominantes são a baixa e alta suscetibilidade a inundações (azul e amarelo). Embora os valores de áreas inundadas em cada classe sejam semelhantes entre os modelos comparados, a distribuição das classes apresenta diferenças conforme se observa na Figura 2. A distribuição das classes na área estudada é relevante uma vez que é preciso identificar o perigo e delimitar a área potencial afetada para propor as estratégias de redução de risco mais apropriadas.

A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** apresenta as áreas resultantes em cada classe para cada MDE e o número de infraestruturas sociais contidas em cada área classificada conforme a suscetibilidade à inundações. Os dois modelos mostram a classe de suscetibilidade Alta ocupando a maior área nos intervalos avaliados. Se identifica que o HAND para o MDE de 12 m considera menor área suscetível se comparado com o HAND de 1 m de resolução. As divergências das áreas estão associadas ao detalhe espacial que cada recurso fornece. Nesse sentido, estudos desenvolvidos com malhas mais grossas abrangem menor cobertura devido à limitação espacial de representar feições da paisagem com dimensão menor que o pixel do produto digital. A comunidade Mãe dos Homens, assim como outras comunidades rurais, possui infraestrutura de tamanhos menores que é dificilmente representada por produtos de sensores com resolução espacial mais grosseira, de modo que, para esse tipo de comunidade se recomenda fortemente etapas paralelas de trabalho em campo e diálogos com a comunidade. A variação das características na paisagem são melhor representadas pelos recursos com melhor resolução espacial, assim variações espaciais e de altimetria podem apresentar divergências quando utilizados dois MDEs com diferente resolução espacial. Se identifica que a classe de suscetibilidade alta é aquela que diverge mais entre os dois MDES, o que

chama a atenção no uso desses recursos, já que na elaboração de estratégias de gestão do risco deve ser considerado. Caso contrário se observa na área classificada como baixa em que há a menor diferença.

As diferenças entre os modelos também resultaram em número diferente de infraestrutura social considerada nas áreas de suscetibilidade à inundação. Observa-se que na A1 há 23 infraestruturas sociais enquanto na A12 há 16 infraestruturas, isso considerando casas, e elementos vulneráveis como a igreja, posto de saúde, salão comunitário e uma ponte. Ao ser a A1 mais abrangente pode levar a estratégias de gestão do risco mais amplas, considerando maior população envolvida. Assim, a qualidade dos MDE como insumo de modelos topográficos influencia indiretamente também no gerenciamento dos desastres naturais.

Tabela 1 – Classificação de áreas de inundação conforme os DEM avaliados

Suscetibilidade a Inundação	Área HAND 1 m (A1) (km <sup>2</sup> )	Infraestrutura social abrangida	Área HAND 12 m (A12) (km <sup>2</sup> )	Infraestrutura social abrangida	Diferença de Áreas (A1 – A12) (km <sup>2</sup> )
Alta	1,562	- Uma ponte; - O salão comunitário; - O posto de saúde - Quatro casas	1,113	- Uma ponte; - O salão comunitário; - O posto de saúde - Duas casas	0,449
Média	0,953	- Nove casas	0,696	- Duas casas	0,257
Baixa	0,574	- Sete casas	0,479	- Igreja - Oito casas	0,095
Total	3,089	- 23 infraestruturas	2,288	- 16 infraestruturas	2,288

A **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** mostra algumas das métricas consideradas para identificar as características das manchas de inundação obtidas e o correspondente cálculo do erro relativo. O HAND com MDE de 1 m emprega mais pixels para a representação da mancha de inundação. Portanto, consegue mostrar uma classificação de áreas de inundação mais detalhada baseado nos critérios considerados no mesmo. Baseando-se na média, os dois mapas resultantes (Figura 2) apontam a área mapeada com uma suscetibilidade média à inundação (2,61 e 3 m). De forma geral, pelo valor do ER identificado entre os dois mapas (3%), é muito difícil afirmar que um modelo é mais ou menos representativo que o outro. No entanto, ao compilar essas informações com os dados obtidos nas entrevistas, pode-se afirmar que o MDE de 1 m é mais representativo da realidade. Isso chama a atenção, uma vez que somente consegue-se identificar o erro da rede de drenagem e das manchas de inundação mediante trabalho externo de campo. Assim, pode-se afirmar que é importante considerar trabalhos complementares entre campo e laboratório, já que confiar somente em processos computacionais pode não chegar a um resultado representativo aplicável às comunidades especialmente rurais.

Tabela 2 – Comparação de métricas e erro relativo para os modelos avaliados.

Mapa	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação
HAND 1 m (m)	2,61	1,96	75
HAND 12 m (m)	3,00	2,12	71

Erro Relativo (%)	0,03	1,11	3700
-------------------	------	------	------

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento de áreas suscetíveis a inundações é uma ferramenta poderosa desde que haja uma representação fiel das características da área de interesse. O modelo HAND gera uma boa fonte de dados para áreas de estudo que não possuem dados de monitoramento, no entanto são dependentes da qualidade e resolução do MDE utilizado. Assim foram comparados os mapas de suscetibilidade à inundação para a comunidade rural Mãe dos Homens obtidos mediante a aplicação do modelo HAND. Nota-se que para mapeamento de inundação, a resolução espacial do MDE é fundamental. Além disso, verifica-se que a participação da comunidade na construção desse tipo de mapa temático é relevante uma vez permite identificar e corrigir erros e inconsistências que não seriam verificadas sem a validação em campo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CNPq e CAPES pelas bolsas recebidas. O presente projeto foi parcialmente suportado pelas agencias CAPES e ANA (Código 001 - 16/2017). Os autores agradecem fortemente à comunidade Mãe dos Homens do município de Praia Grande em Santa Catarina e a todos seus moradores por fazerem parte da pesquisa e responder aos questionários, também ao ICMBio do Parque Nacional de Aparados da Serra por facilitar pesquisas na região de estudo.

## REFERÊNCIAS

- Bates, P. D., Horritt, M. S., & Fewtrell, T. J. (2010). A simple inertial formulation of the shallow water equations for efficient two-dimensional flood inundation modelling. *Journal of Hydrology*, 387(1), 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.027>
- Carvalho, M. M., González-Ávila, I., & Kobiyama, M. (2023). Entrevista como ferramenta na análise de eventos extremos: II - percepção do entorno, base para a educação ambiental. In: III END - Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14395>
- Castro, A. L. (1998). Glossário de defesa civil estudos de riscos e medicina de desastres. 2da.
- Goerl, R. F., Michel, G. P., & Kobiyama, M. (2017). Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o Modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/184079>
- González-Ávila, I., Carvalho, M. M., Kobiyama, M., & Jato-Espino, D. (2023). Entrevista como ferramenta na análise de eventos extremos: I a percepção do perigo em comunidades rurais. In: III END - Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14394>
- González-Ávila, I., Jato-Espino, D., Paixão, M. A., Carvalho, M. M., & Kobiyama, M. (2023). Sociogeomorphological Analysis in a Headwater Basin in Southern Brazil with Emphasis on Land Use and Land Cover Change. *Land*, 12(2), Art. 2. <https://doi.org/10.3390/land12020306>
- González-Ávila, I., Paixão, M. A., & Kobiyama, M. (2022). Análise geomorfométrica de uma bacia montanhosa com presença de cânion. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 23(4), Art. 4. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2164>
- Kobiyama, M., & Zanandrea, F. (2023). Introdução. Em *Desastres e Água: Eventos Históricos no Brasil* (p. 15–24). <https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2023/04/Kobiyama-e-Zanandrea-2023-capitulo-1-Introducao.pdf>
- McCall, M. K. (2008). Participatory Mapping and Participatory GIS (PGIS) for CRA, Community DRR and Hazard Assessment. [http://drm.cenn.ge/Trainings/Multi%20Hazard%20Risk%20Assessment/Lectures\\_ENG/Session](http://drm.cenn.ge/Trainings/Multi%20Hazard%20Risk%20Assessment/Lectures_ENG/Session)

%2004%20Elements%20at%20risk/Background/PGIS%20for%20Disaster%20Risk%20Assessment.pdf

- Muthusamy, M., Casado, M. R., Butler, D., & Leinster, P. (2021). Understanding the effects of Digital Elevation Model resolution in urban fluvial flood modelling. *Journal of Hydrology*, 596, 126088. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126088>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M., & Saleska, S. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404(1), 13–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.051>
- Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Momo, M. R., Severo, D. L., Pinheiro, A., & Nobre, C. A. (2016). HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*, 30(2), 320–333. <https://doi.org/10.1002/hyp.10581>
- Pinheiro, A., & Severo, D. L. (2023). Enchente e Inundações na Bacia do Rio Itajaí, SC. Em *Desastres e Água: Eventos Históricos no Brasil* (p. 400). ABRHidro. <https://www.ufrgs.br/gpden/wordpress/wp-content/uploads/2023/04/Kobiyama-e-Zanandrea-2023-capitulo-1-Introducao.pdf>
- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., Tomasella, J., & Waterloo, M. J. (2008). HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112(9), 3469–3481. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018>
- Vasconcellos, S. M., Kobiyama, M., Dagostin, F. S., Corseuil, C. W., & Castiglio, V. S. (2021). Flood Hazard Mapping in Alluvial Fans with Computational Modeling. *Water Resources Management*, 35(5), 1463–1478. <https://doi.org/10.1007/s11269-021-02794-7>
- Xafoulis, N., Kontos, Y., Farsiroto, E., Kotsopoulos, S., Perifanos, K., Alamanis, N., Dedousis, D., & Katsifarakis, K. (2023). Evaluation of Various Resolution DEMs in Flood Risk Assessment and Practical Rules for Flood Mapping in Data-Scarce Geospatial Areas: A Case Study in Thessaly, Greece. *Hydrology*, 10(4), Art. 4. <https://doi.org/10.3390/hydrology10040091>
- Xu, K., Fang, J., Fang, Y., Sun, Q., Wu, C., & Liu, M. (2021). The Importance of Digital Elevation Model Selection in Flood Simulation and a Proposed Method to Reduce DEM Errors: A Case Study in Shanghai. *International Journal of Disaster Risk Science*, 12(6), 890–902. <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00377-z>