

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DO PERIGO DE INUNDAÇÃO NOS LEQUES ALUVIAIS DA BACIA DO ALTO RIO MAMPITUBA, RS/SC.

Sofia Melo Vasconcellos¹ & Masato Kobiyama²

RESUMO – As inundações que ocorrem em leques aluviais são muito peculiares e também perigosas devido à mobilidade do canal dos rios nessas regiões. Essa mobilidade aumenta a incerteza do curso a ser tomado pela água a cada inundação ou fluxo de detritos, dificultando o mapeamento de perigo nestas áreas. O escoamento em leques aluviais é bidimensional; portanto, mapear inundações em locais sem dados hidrológicos utilizando modelos bidimensionais pode se tornar inviável. Dessa forma, neste trabalho foram analisados dois modelos, o FAN Model, modelo desenvolvido pela FEMA para análise do perigo de inundação em leques aluviais; e o modelo geomorfológico HAND, a partir do qual foi gerado um mapa de perigo de inundação. A área de estudo escolhida foi a bacia do alto rio Mampituba, onde foram identificados dois leques aluviais principais: o leque do rio do Boi, e o leque do rio Molha Coco. O FAN Model apresentou resultados mais coerentes com o aspecto dos leques aluviais.

ABSTRACT– Floods occurring at alluvial levels are very peculiar and dangerous, due to the mobility of the channel in the regions. Such mobility increases the uncertainty of the course to be occupied by the water or the debris flow, which makes hazard mapping difficult. The flow in alluvial fans is two-dimensional; therefore, the flood mapping in these regions without hydrological data can be unfeasible. Thus, the present study used two models: the Model FAN, developed by FEMA for the flood hazard analysis in alluvial fans, and the geomorphic model HAND, from which a flood hazard map was generated. The study area was the upper Mampituba river basin where two main alluvial fans were identified: the fan of the Boi River and the fan of the Molha Coco River. The FAN Model presented results more coherent with alluvial fan feature.

Palavras-Chave – Mapa de Perigo, Inundação, Leque Aluvial

INTRODUÇÃO

Leques aluviais são formas deposicionais proeminentes em forma de cone, advindos da distribuição regional de sedimentos através dos processos erosivos (desagregação, transporte e deposição) em bacias hidrográficas. Estes se formam no ápice topográfico, que é o ponto exato onde um rio sai da encosta da montanha e entra no fundo do vale, este ponto é caracterizado pelo aumento da largura do canal, redução da declividade, e aumento da carga de sedimentos (Ventra e Clarke, 2018).

1) Aluna de Doutora do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre –RS, Brasil, sofimello@hotmail.com, 51 3308-7518

2) Professor, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, Brasil, masato.kobiyama@ufrgs.br, 51 3308-7518

A maioria dos leques aluviais se origina em grandes bacias hidrográficas localizadas em regiões tectonicamente ativas, ou em terras altas (platôs inativos), onde uma sobrecarga de sedimentos é produzida e transportada para as margens das planícies adjacentes. Estes sedimentos muitas vezes possuem grande diâmetro, e podem ter algum grau de coesão nas encostas íngremes. Esta configuração pode levar à formação de novos canais durante um evento de inundação, o que causa um maior alcance do fluxo da água, e conseqüentemente um maior potencial para causar danos (Mollaei *et al.*, 2018). Por isso, as inundações que ocorrem em leques aluviais são consideradas perigosas, uma vez que a inundação se move do ápice do leque com muita força em direção à jusante, carregando uma grande quantidade de substrato e detritos (Merheb *et al.*, 2016).

Em função das características descritas acima, fenômenos de inundação nestas regiões devem ser estudados a partir de modelos que considerem as suas características particulares. O escoamento nos leques aluviais é tridimensional, sendo bem representado por modelos bidimensionais; porém, a utilização de modelos bidimensionais hidrodinâmicos pode ser inviável em áreas sem monitoramento hidrológico (Jafarzagdegan *et al.*, 2018).

Após dezenas de inundações e ocorrências de fluxo de detritos em leques aluviais nos Estados Unidos na década de 70, a FEMA (*United States Federal Emergency Management Agency*) desenvolveu um método para análise do perigo de inundação em leques aluviais, o FAN Model, que prevê as velocidades e profundidades de inundação e a partir destas informações gera um mapa de perigo (FEMA, 2003).

Os métodos tradicionais para previsão de inundação analisam a bacia hidrográfica como um todo e consideram que o rio tem o leito fixo, que transborda ao longo de suas margens num evento hidrológico extremo. A FEMA reconheceu que esta premissa não representa adequadamente a dinâmica que ocorre nos leques aluviais, e, portanto, adotou as equações propostas por Dawdy (1979), as quais são aplicadas especificamente nas áreas de leque aluvial, para melhor descrever os perigos de inundação decorrentes dos processos não ribeirinhos como as avulsões e os deslocamentos de canais de rios, característicos destas regiões.

Apesar de não requerer dados físicos das áreas estudadas (motivo pelo qual sua utilização é criticada), o FAN Model necessita de dados de vazão com período de retorno de 100 anos, não podendo então ser aplicado em regiões sem monitoramento hidrológico. Dessa forma, uma alternativa seria analisar locais sem dados hidrológicos com o HAND proposto por Rennó *et al.* (2008), um modelo geomorfológico, amplamente utilizado para análise de inundação. A partir da topologia gerada por este modelo, é possível estimar a altura da inundação em dada localidade e posteriormente realizar o mapeamento de um índice perigo na área analisada a partir do cálculo do Índice de Perigo.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi delimitar os leques aluviais da bacia do alto rio Mampituba –RS/SC, e analisar o perigo de inundação dos mesmos a partir da aplicação do FAN Model e do modelo HAND, comparando os resultados obtidos pelos dois métodos.

METODOLOGIA

As principais etapas de trabalho necessárias para elaboração dos mapas de perigo de inundação estão descritas na Figura 1.

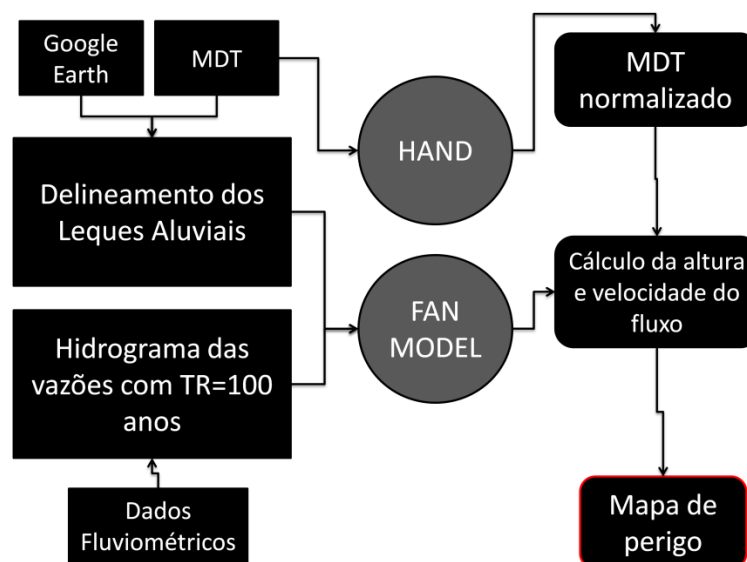


Figura 1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

Os dados necessários para o delineamento dos leques aluviais da área de estudo são as curvas de nível, obtidas a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT), e imagens de satélite. Além disso, o FAN Model precisa dos valores máximos de vazão com um tempo de retorno de 100 anos para efetuar os cálculos da velocidade e altura da inundação ao longo do leque aluvial, permitindo o delineamento das faixas de perigo, e a geração do mapa de perigo de inundação.

O modelo HAND gera um MDT normalizado a partir do MDT fornecido como dado de entrada. Com este resultado é possível calcular a altura e velocidade do fluxo e posteriormente elaborar o mapa de perigo. Finalmente, os resultados obtidos através dos dois modelos serão comparados e discutidos.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do alto Rio Mampituba possui aproximadamente 400 km², tendo seu exutório no município de Praia Grande –SC. A maior parte da sua área está localizada no estado de Santa Catarina, e uma pequena porção restante está no Rio Grande do Sul (BOHN, 2008). Segundo a classificação do Sistema de Köppen, o clima da região é subtropical úmido sem estação seca definida, com verão ameno (Cfb). A precipitação média anual é de 1.500 mm e evapotranspiração média anual de 900 mm (PANDOLFO *et al.*, 2002).

A região é marcada pela presença de escarpas da formação Serra Geral, especialmente derrames basálticos, com predominância da Floresta Ombrófila Mista. As encostas da serra são abruptas, apresentando grande amplitude altimétrica, com vales fortemente encaixados que se abrem na planície formando depósitos de leques aluviais.

Duarte (1995) estudou a morfologia da área de estudo, incluindo a caracterização dos leques aluviais ali presentes, e gerou um mapa com a escala de 1:58.000, onde é possível identificar a localização dos leques aluviais, porém sem uma delimitação precisa dos mesmos. A partir desta informação, foram selecionadas duas sub-bacias para delimitação dos respectivos leques aluviais: a do rio do Boi e a do rio Molha Coco (Figura 2).

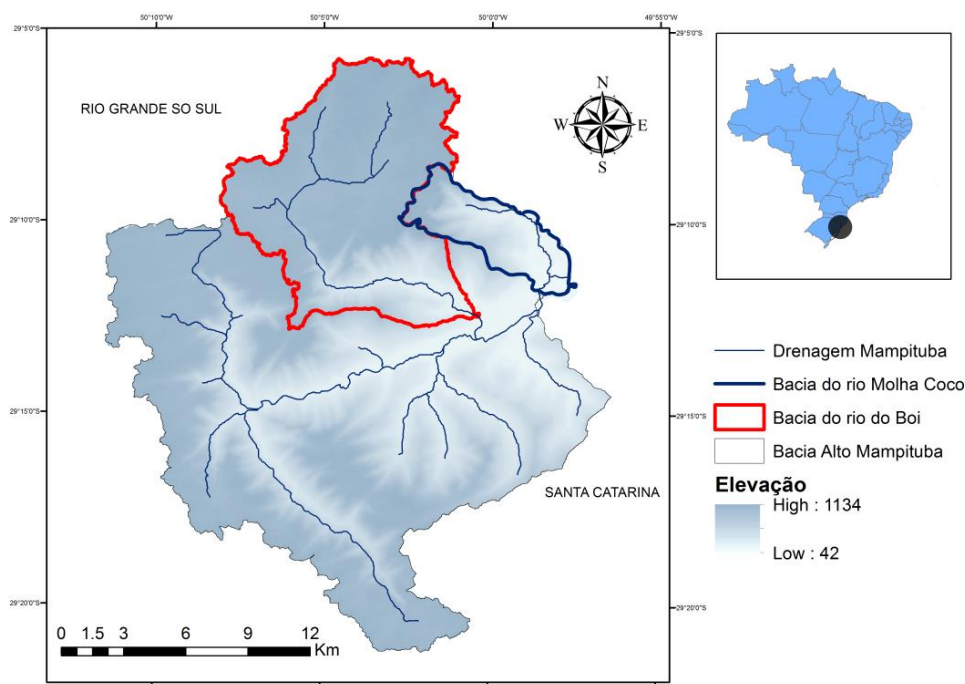


Figura 2. Localização da área de estudo

Dados Utilizados

Na área de estudo, existe apenas uma estação fluviométrica com uma série longa de dados. A mesma é operada pela EPAGRI (código 84970000), e está localizada no exutório da bacia, disponibilizando uma série de 33 anos de dados de vazão (início 1986 – atual).

O FAN Model requer valores máximos de vazão correspondentes ao ápice do leque aluvial, portanto, as vazões para estes pontos foram obtidas por regionalização, a partir da série histórica disponível. Em seguida, as vazões máximas foram estimadas pelo Método de Gumbel (Tabela 1).

Tabela 1. Vazões (m³/s) e respectivos períodos de retorno (TR), obtidos pela fórmula de Gumbel.

TR (anos)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Molha Coco	17,99	20,14	21,38	22,25	22,9	23,47	23,93	24,33	24,68	26,00
Rio do Boi	48,61	54,41	57,75	60,10	61,91	63,40	64,65	65,73	66,68	67,54

O Modelo Digital de Terreno utilizado para extrair as curvas de nível foi o SRTM 30.

Descrição de modelos utilizados

Norini *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo para delineamento de leques aluviais no SIG ArcMap. O único dado de entrada necessário são as curvas de nível. Posteriormente imagens de satélite são utilizadas para verificação dos resultados. O algoritmo utiliza três principais critérios:

- (1) Um ápice de leque aluvial ocorre quando um canal que se origina num vale confinado lateralmente atravessa uma mudança topográfica para uma área de planície não confinada (planície aluvial, depressão, etc.)
- (2) A forma do leque aluvial é geralmente cônica e côncava. Essa superfície cônica irradia do ápice do leque até a interseção com a topografia ao redor do leque.
- (3) A inclinação da superfície cônica é definida pela diferença de elevação entre o ápice e os pontos finais do leque. Estes pontos finais estão localizados nos locais onde ocorre mudança de inclinação no limite distal do leque.

O FAN Model foi desenvolvido pela FEMA, e utiliza a teoria de Dawdy (1979) para delineamento de áreas propensas a inundação em leques aluviais. Esta teoria atesta que a inundação nos canais ocorre de forma aleatória em leques aluviais, ou seja, cada ponto de um leque tem a mesma chance de se tornar um novo canal do que qualquer outro ponto. Dessa forma, todas as áreas de um leque aluvial estão sujeitas a inundação, e há uma relação fixa entre profundidade e vazão. A probabilidade de incidência de inundação neste modelo pode ser determinada pela equação a seguir:

$$P(H = 1) = \int_{q_0}^{\infty} P_{H|Q}(1, q) f_Q(q) dq \quad (1)$$

onde H é uma variável aleatória denotando a ocorrência de inundação num determinado ponto sujeito a inundação, sendo igual a 1 quando o local está inundado e igual 0 quando não está inundado; Q é uma variável aleatória que denota a magnitude da inundação; $P_{H|Q}$ é a probabilidade de uma localidade ser inundada, dada uma vazão de magnitude q ocorrendo; e f_Q é a função densidade probabilidade que define a chance de uma inundação de magnitude entre q e $q+dq$ ocorrer num dado ano.

As áreas de perigo de inundação são classificadas como zonas AO. As zonas AO são definidas como as zonas sujeitas a uma cheia com tempo de retorno de 100 anos, com uma média de altura da água de 0,3048 a 0,9144 m. Estas áreas de perigo são subdivididas em zonas AO com alturas de inundação e velocidade similares. O programa estima os valores de altura e velocidade a partir dos dados de vazão fornecidos pelo usuário.

Sendo assim, o objetivo do FAN Model é calcular as larguras de contorno correspondentes aos limites das zonas AO de inundação, onde esses limites acompanham o formato das curvas de nível

de um leque aluvial. Com estas informações, é possível gerar o mapa de perigo, subdivido em áreas de muito perigo muito alto, alto, médio, baixo e muito baixo.

O modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND), é um modelo geomorfológico, que vem sendo utilizado para o mapeamento de áreas suscetíveis à inundação através da normalização topográfica da paisagem. Utiliza como dado de entrada um MDT e fornece como dado de saída um MDT normalizado, em relação à distância vertical relativa ao curso de água mais próximo. A topologia HAND gerada pode ser utilizada para estimar a altura do fluxo da água de uma inundação, informação útil para o mapeamento de perigo de inundação (Mengue *et al.*, 2016).

Mapeamento do Índice de Perigo

Stephenson (2002) definiu o Índice de Perigo como:

$$IP = h \cdot v \quad (2)$$

onde v é a velocidade do fluxo (m/s); e h é a altura do fluxo (m). O Índice de Perigo está diretamente relacionado à energia do fluxo, ou seja, ao seu potencial destrutivo (Monteiro e Kobiyama, 2014).

O resultado gerado pelo modelo HAND é uma topologia que representa a altura da água em um ponto em relação à drenagem mais próxima. A partir deste dado é possível gerar a altura do fluxo, conforme feito por Caron *et al.* (2018):

$$h = h_i - h_n \quad (3)$$

onde h_i (m) é o valor do pixel do HAND correspondente ao ponto de alcance máximo de inundações prévias, e h_n (m) é o valor de cada pixel da topologia HAND.

A etapa seguinte é o cálculo da velocidade através da equação de Manning:

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2} \quad (4)$$

onde n é coeficiente de rugosidade de Manning ($s/m^{1/3}$); R_h é o raio hidráulico da seção (m); e S a declividade (m/m). O valor de n , adotado foi de 0,07. O valor de S , foi obtido a partir do MDT, utilizando a ferramenta *Slope* do ArcGIS.

Por fim, através de álgebra dos *rasters* de h e S no ArcGIS, calculou-se o valor de IP através da seguinte equação:

$$IP = \frac{1}{n} \cdot h^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (5)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Delimitação dos leques aluviais

Foram identificados e delimitados dois leques aluviais, um no rio do Boi, e o outro no rio Molha Coco, correspondentes aos cânions Itaimbezinho, e Molha Coco, respectivamente. A Figura 3

apresenta os limites dos leques e sua variação de elevação. As áreas do leque Molha Coco do leque rio do Boi são 2,88 km² e 6,13 km², respectivamente.

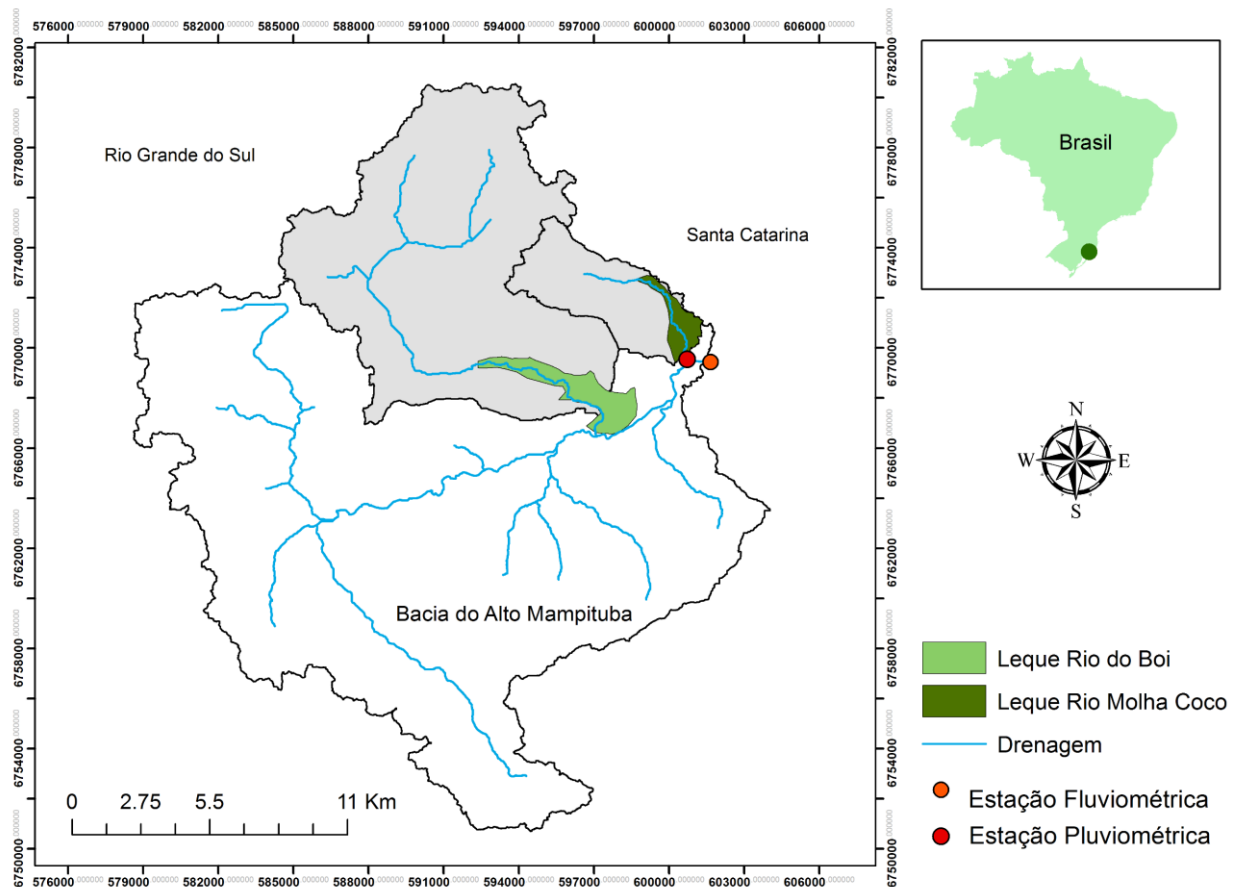


Figura 3. Leques aluviais delimitados.

FAN Model e Índice de Perigo derivado do HAND

Os resultados provenientes do FAN Model foram disponibilizados pelo modelo num arquivo .txt, e posteriormente interpretados em ArcGIS, onde foi gerado um *shapefile* para cada leque.

Os resultados do mapeamento de perigo, com dois modelos, para os leques do rio do Boi e rio Molha Coco podem ser visualizados nas Figuras 4 e 5 respectivamente, onde cada cor representa um nível de perigo em função da velocidade e da altura da inundação calculados, aqui nota-se que as legendas valem para as figuras (a) e (b).

A Tabela 2 apresenta os critérios adotados para calcular o *IP* com os dois modelos. O FAN Model calcula automaticamente valores de velocidade e altura do fluxo considerando que sempre existe uma relação fixa entre os mesmos, ou seja, o modelo gera os resultados de acordo com as faixas de classificação apresentadas na Tabela 2, e cada faixa de perigo apresenta o mesmo valor de velocidade e altura do fluxo. Já para o mapa de perigo derivado do HAND, o *raster* obtido a partir da equação (5) foi reclassificado para obedecer aos critérios da Tabela 2.

No leque do rio do Boi (Figura 4), observa-se que o FAN Model classificou a região mais próxima ao ápice do leque como sendo de perigo muito alto, o que é coerente pois esta é a região onde a água e sedimentos saem da encosta com maior velocidade, espalhando-se ao encontrar a planície. As demais regiões do leque, foram classificadas como sendo de perigo alto, médio e baixo, correspondendo aos pontos onde o fluxo perde velocidade.

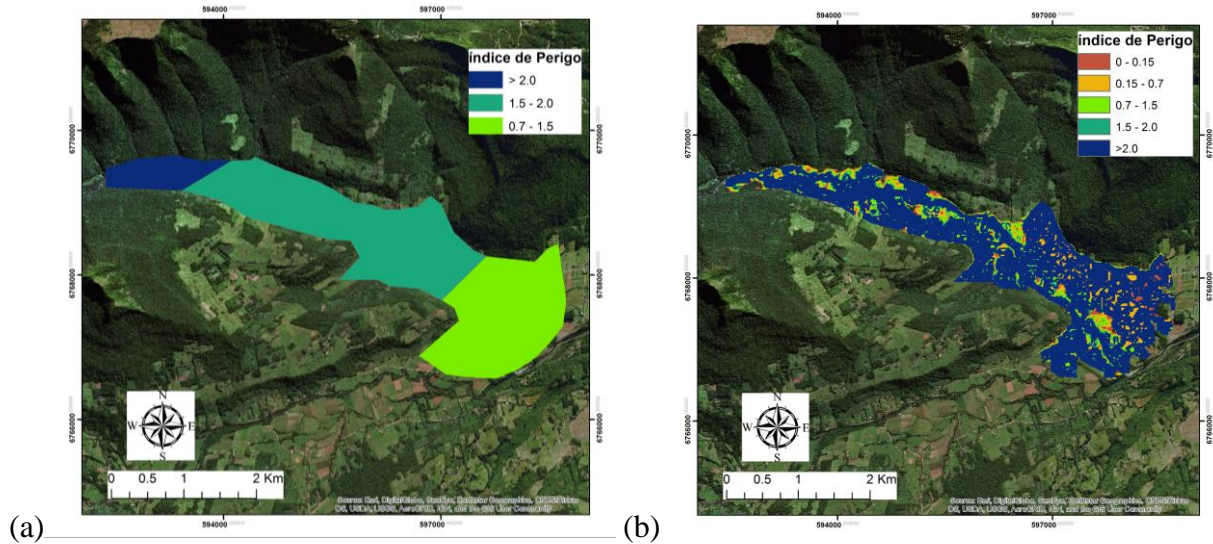


Figura 4. Mapa de perigo de inundação para o leque aluvial do rio do Boi: (a) FAN Model; e (b) HAND.

No leque aluvial do Molha Coco (Figura 5), o FAN Model identificou apenas uma pequena área como de perigo “muito alto”, sendo a maior parte do leque classificada como perigo “alto”, e a parte mais baixa como de perigo “médio”.

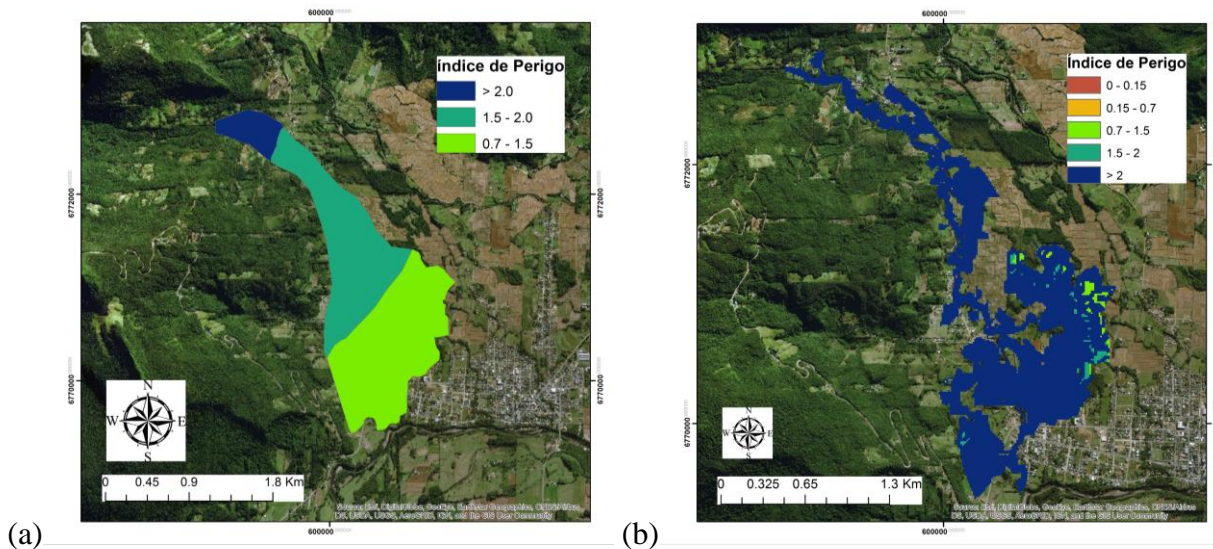


Figura 5. Mapa de perigo de inundação para o leque aluvial do rio Molha Coco: (a) FAN Model; e (b) HAND.

Tabela 2. Critério para delineamento dos mapas de perigo

Perigo	Velocidade (m/s)	Altura (m)	Índice de Perigo (IP)
Muito alto	$V > 2,00$	$H > 1,0$	>2
Alto	1,5-2,0	0,5-1,0	1,5-2

Médio	1,3-1,5	0,3-0,5	0,7-1,5
Baixo	1-1,3	0,15-03	0,15-0,7
Muito baixo	V < 1,0	H < 0,15	0,15 <

Houve diferenças espaciais na representação dos resultados: o FAN Model classifica como mais perigosas às áreas mais próximas ao ápice do leque, considerando a mobilidade do canal nestes pontos. Já o HAND, classifica boa parte do leque como perigosa. Também se observa que, de acordo com o FAN Model, a maior parte das áreas dos dois leques aluviais analisados se classifica como área de perigo “alto” ou “muito alto”, enquanto o resultado obtido com o HAND identifica a quase totalidade da área dos leques como de perigo “muito alto”.

O HAND apresenta uma informação mais incerta, pois como o modelo não considera que a rede de drenagem pode ser alterada com o tempo, o mapa de perigo gerado pode não ser representativo de eventos catastróficos futuros. Além disto, a metodologia adotada para o cálculo do índice de perigo possui uma limitação, referente ao cálculo da velocidade. Os resultados da declividade calculada pela ferramenta Slope do ArcGIS geram dados de declividade no sentido de maior desnível do terreno. Este sentido não necessariamente é o sentido do escoamento que ocorre no rio. Justamente por isso, as velocidades calculadas a partir deste método não são necessariamente válidas para toda a extensão da área de inundação, o que pode ter aumentado significativamente a incerteza da estimativa de perigo deste método.

Uma alternativa para trabalhos futuros seria a combinação entre os diferentes métodos, como realizado por Mollaei *et al.* (2018), que combinaram o FAN Model, um modelo geomorfológico e um bidimensional para mapeamento de perigo em leques aluviais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho identificou as áreas de leque aluvial da bacia do alto rio Mampituba, os quais foram identificados como Leque do rio do Boi, e Leque Molha Coco, com 4,54 km², e 7,71 km², respectivamente. Através dos modelos FAN Model e de um índice de perigo derivado do HAND, foi possível identificar as áreas de maior perigo de inundação nestes leques.

O FAN Model apresentou resultados mais coerentes com o aspecto dos leques aluviais. Porém vale ressaltar que o FAN Model é um modelo simples, unidimensional, que não leva em consideração as características físicas de cada localidade. Por esta razão, recomenda-se para trabalhos futuros aplicar na mesma região um modelo bidimensional e comparar os resultados obtidos, já que o comportamento hidráulico nas regiões de leque aluvial também tem esse comportamento bidimensional.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, Chamada nº 16/2017, Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- BOHN, L. (2008). “*Expressões de conhecimento de grupos sociais locais para a gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Mampituba*”. UFSC Florianópolis: (dissertação de mestrado).
- CARON, B.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. (2018). “*Determination of the hazard index from the mapping of susceptible areas to flood with the HAND model.*” In: Anais do I Encontro Nacional de Desastres, Porto Alegre – RS. 8p.
- DAWDY, D.(1979). “*Flood Frequency Estimates on Alluvial Fans*”. J. Hydraul. Div. 105, pp.1407–1413.
- DUARTE, G.M.(1995). “*Depósitos cenozoicos costeiros e a morfologia do extremo sul de Santa Catarina*”. Volume 1. São Paulo: USP. (tese de doutorado).
- Federal Emergency Management Agency (2003). Guidelines and Specifications for Flood Hazard Mapping Partners, in: Vol. 1 Flood Stud. Mapp., 1–26, disponível: http://www.fema.gov/fhm/dl_cgs.shtm (acesso: Abril 2019).
- JAFARZADEGAN, K.; MERWADE, V.; SAKSENA, S. (2018). “*A geomorphic approach to 100-year floodplain mapping for the Conterminous United States*”. Journal of Hydrology 561, pp.43-58.
- MENGUE, V. P. et al. (2016). “*Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai*”. Pesquisas em Geociências 43(1), pp.41-53.
- MERHEB, M., MOUSSA, R., ABDALLAH, C., COLIN, F., PERRIN, C., AND BAGHDADI, N. (2016). “*Hydrological response characteristics of Mediterranean catchments at different time scales: a meta-analysis*”. Hydrologic Science Journal 61, pp.2520–2539.
- MOLLAEI, Z., MADANI, H., MOGHIMZADEH, H., DAVARY, K., AND FARIDANI, F. (2016). “*Predicting Avulsion Potential On Alluvial Fans Using FLO-2D Model – A Case Study*”, in: 9th World Congress of EWRA “Water Resources Management in a Changing World: Challenges and Opportunities,” EWRA, Istanbul, Turkey, p. 12.
- MONTEIRO, L.R.; KOBAYAMA, M. (2014). “*Influências da distribuição temporal de precipitação no mapeamento de inundação*”. REGA 11, pp.25-35.
- NORINI, G.; ZULUAGA, M.; ORTIZ, I.; AQUINO, D.; LAGMAY, A. (2016). “*Delineation of alluvial fans from Digital Elevation Models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars.*” Geomorphology 273, pp.134-149.
- PANDOLFO, C.; et al. (2002). “*Atlas climatológico do Estado de Santa Catarina*”. Florianópolis: Epagri, 2002. CD-ROM. Disponível em: <http://www.ciram.epagri.sc.gov.br>.
- RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. (2008). “*HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia*”. Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 3469-3481.
- STEPHENSON, D. (2002). “*Integrated flood plain management strategy for the Vaal.*” Urban Water 4(1), pp.425-430.
- VENTRA, D.; CLARKE, L.E. (2018). “*Geology and geomorphology of alluvial and fluvial fans: Current progress and research perspectives*”. Geological Society, London, Special Publications, 440, <https://doi.org/10.1144/SP440.16>.