

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DA SEGURANÇA DE TURISTAS NA TRILHA DO RIO DO BOI NO PARQUE NACIONAL APARADOS DA SERRA

Lara Cruz Nonnemacher¹; Alessandro Gustavo Franck² & Masato Kobiyama³

RESUMO – Fluxos de detritos são fenômenos naturais que se caracterizam como desastres naturais quando afetam a sociedade de alguma forma, física ou economicamente. Como o ecoturismo vem aumentando ao longo dos anos, a preocupação com a segurança dos turistas também aumenta. A fim de proporcionar maior segurança aos turistas que realizam a trilha do Rio do Boi, o presente trabalho teve como objetivo verificar o alcance do fluxo de detritos em uma sub-bacia por onde passa o Rio do Boi e um atalho, através da modelagem hidrogeomorfológica de estabilidade de encostas com o Shalstab e de fluxo de detritos com o Kanako-2D. Foram realizadas simulações considerando três diferentes cenários: o primeiro considera a região da margem superior como geradora de detritos, o segundo, a central, e o terceiro, ambas. O tempo mínimo para o fluxo de detritos chegar à trilha foi de 4 minutos, 2,5 minutos e 2 minutos, respectivamente. A distância máxima alcançada foi de aproximadamente 0,7 km para os dois primeiros cenários e de 1,3 km para o terceiro. Conclui-se que, apesar da grande incerteza das simulações, o estudo é útil para medidas iniciais de segurança para turistas.

ABSTRACT–Debris flows are natural phenomena which are characterized as natural hazards when affect society, physically or economically. As ecotourism increases over the years, the concern about tourists' security also increases. In order to provide higher security to the tourists who enjoy the trail of the Boi River, the present work had as objective to verify the reach of debris flow in a sub-basin where the Boi River and one shortcut cross, through hydrogeomorphic modeling of slopes stability with Shalstab and debris flow with Kanako-2D. Simulations were performed considering three different scenarios: the first one considers superior basin margin area as debris flow source area, the second one, the central area, and the third one is a combination of both scenarios 1 and 2. The minimum time for debris flow to hit the trail was 4 minutes, 2.5 minutes and 2 minutes in the scenario 1, 2 and 3, respectively. The maximum distance reached was about 0.7 km for the scenarios 1 and 2 and 1.3 km for scenario 3. It is concluded that, although the huge uncertainty of the simulations, the present study is useful to begin to establish security measures for tourists.

Palavras-Chave – Fluxo-de-detritos, modelagem-hidrogeomorfológica, turismo.

INTRODUÇÃO

O ecoturismo se trata de uma atividade turística que tem como meretriz a conscientização ecológica, utilizando o patrimônio natural e cultural de forma sustentável, reforçando ideais como a

1)UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, CEP: 91501-970, (51)3308 6324, lara_nonne@hotmail.com
2)UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, CEP: 91501-970, (51)3308 6324, alessandro_fl7@hotmail.com
3) UFRGS: Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, CEP: 91501-970, (51)3308 6324, masato.kobiyama@ufrgs.br

preservação e o cuidado com o meio ambiente. Tal atividade vem se tornando cada vez mais relevante para a economia, visto que a preocupação ecológica cada vez se torna mais evidente na sociedade como um todo. Segundo a Organização Mundial do Turismo, o turismo cresce 7,5% por ano, enquanto o ecoturismo cresce mais de 20%. O Brasil é referência mundial do ramo, onde a atividade gera cerca de US\$ 70 milhões no ano (Brasil, 2018).

No entanto, o ecoturismo é diretamente afetado pela ocorrência de desastres naturais. Fenômenos naturais ocorrem o tempo todo e sempre ocorrerão, sendo eles movimentos de massa, enchentes, inundações, entre outros. O grande problema é quando tais fenômenos atingem, física ou economicamente, a sociedade, caracterizando um desastre natural. Infelizmente, estes desastres são muito comuns no Brasil, muitas vezes levando à morte de pessoas.

Em muitos casos, o ecoturismo ocorre em lugares de grande perigo de ocorrência de desastres naturais. Considerando que os turistas não conhecem o local visitado, sua vulnerabilidade é grande, o que faz com que o risco aumente. Portanto, a modelagem de fenômenos naturais se faz extremamente importante nos locais que realizam esta atividade.

O presente trabalho enfoca no fenômeno do movimento de massa de encostas, a partir da análise de uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio do Boi, localizada no Parque Nacional Aparados da Serra. Os turistas que fazem o passeio do rio do Boi, obrigatoriamente têm que passar por essa sub-bacia, o que obriga o gestor do Parque a garantir a segurança dos mesmos. Nesse passeio de ecoturismo, as maiores preocupações são desastres naturais associados à chuva intensa, ou seja, movimentos de massa (deslizamentos e fluxos de detritos) e inundações bruscas.

Nessa circunstância, o presente trabalho teve como objetivo verificar o local de alcance e a velocidade do fluxo de detritos com modelagem hidrogeomorfológica, de forma que seja previsto o tempo para o fluxo de detritos atingir a trilha existente nessa sub-bacia. Na modelagem, dois *softwares* foram utilizados: o Shalstab, desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994) para simular o deslizamento, e o Kanako-2D, desenvolvido por Nakatani *et al.* (2008), para simular o fluxo de detritos.

Melo e Kobiyama (2018) apresentaram uma revisão do uso do Shalstab no Brasil, comentando que ele vem sendo utilizado cada vez mais no país. Embora o Kanako-2D seja mais popularmente utilizado no Japão, sua aplicação no Brasil também se encontra com bom desempenho, por exemplo, Michel *et al.* (2015), Paixão e Kobiyama (2017), e Kobiyama e Michel (2019). Assim sendo, Michel e Kobiyama (2016) apresentaram uma metodologia de uso do Shalstab e do Kanako-2D a fim de realizar estudos sobre deslizamento/fluxo de detritos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo é uma sub-bacia (0,33 km²) dentro da Bacia Hidrográfica do Rio do Boi, localizada no Parque Nacional Aparados da Serra na fronteira entre os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Embora o parque compreenda os municípios Cambará do Sul (RS) e Praia Grande (SC), a sub-bacia de estudo está inteiramente englobada pelo município de Praia Grande/SC (Figura 1).

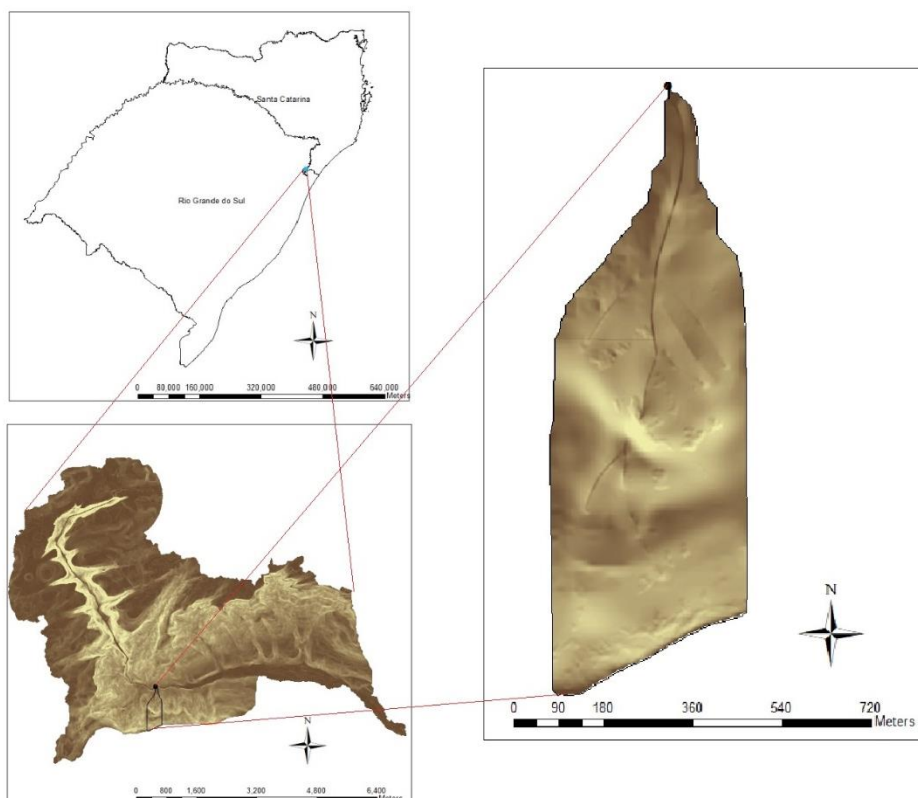


Figura 1: Localização da área estudada e informação hipsométrica.

Devido à facilidade do deslocamento dos turistas e à segurança destes, guias turísticos locais utilizam vários atalhos, que consistem em trilhas de chão no passeio do rio do Boi. Nesta sub-bacia, há o cruzamento de um atalho e o exutório se localiza no rio do Boi. Dessa maneira, os turistas obrigatoriamente devem passar pelo exutório e/ou pelo atalho.

Teoria do Shalstab

Primeiramente é necessário verificar a estabilidade das encostas, o que é feito através da ferramenta Shalstab, a qual é aplicada em um *software* de SIG (Sistema de Informação Geográfica), aqui foi utilizado o ArcGIS. O Shalstab une as teorias geomecânica, da encosta infinita, e hidrológica, de forma que avalia a estabilidade e a umidade. O resultado é dado por $\log\left(\frac{q}{T}\right)$.

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} \right) + \frac{cs}{\cos^2 \theta \cdot \tan \varphi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (1)$$

onde q é a taxa de recarga uniforme [mm]; T é a transmissividade do solo [m²/dia]; b é o comprimento de contorno [m]; a é a área de contribuição à montante [m²]; θ é a declividade da encosta [°]; ρ_s é a massa específica do solo [kg/m³]; ρ_w é a massa específica da água [kg/m³]; φ é o ângulo de atrito interno do solo [°]; cs é a coesão do solo [N/m²]; z é a profundidade do solo [m]; e g é a aceleração da gravidade [m/s²].

Aplicação do Shalstab

A partir do Modelo Digital do Terreno (MDT), obtido no Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC), foram calculadas a declividade da encosta e a área de contribuição à montante. A partir do mapa de solos da Embrapa (Santos *et al.*, 2011), percebe-se que os solos predominantes na região estudada são os Nitossolos Vermelhos e os Neossolos Litólicos. Com o conhecimento dos tipos de solos presentes, foi realizada uma pesquisa para a estimação de três dos parâmetros do solo necessários (ρ_s , φ e z), apresentados por Silva *et al.* (2012).

No entanto, o valor da coesão do solo era desconhecido, o que foi contornado a partir de várias simulações com diversos valores. Com o trabalho de campo, foi desenvolvido o conhecimento da topografia, o que permitiu a avaliação da coerência dos resultados das simulações com a realidade, permitindo a escolha do valor mais adequado de coesão. O presente trabalho considerou que o efeito da vegetação seja nulo; portanto, os parâmetros relacionados à vegetação não foram computados. A Tabela 1 apresenta os valores utilizados na simulação com o Shalstab.

Tabela 1: Parâmetros utilizados no Shalstab.

Parâmetro	Valor
Coesão do solo (cs)	3000 N/m ²
Coesão das raízes (cr)	0 N/m ²
Profundidade do solo (z)	0,5 m
Ângulo de atrito (ϕ)	23°
Carga proveniente da vegetação (w)	0 kg/m ²
Peso específico do solo (rs)	1729 kg/m ³

Teoria do Kanako-2D

O Kanako-2D é um *software* que foi desenvolvido por Nakatani *et al.* (2008) para a simulação do impacto de barragens de sedimentos, também utilizado para a modelagem de fluxos de detritos. O fluxo de detritos é dividido entre as zonas de iniciação, transporte e deposição (Figura

2). O modelo se divide nas partes de 1D e 2D, sendo a primeira responsável pela simulação da propagação do fluxo através do canal e a segunda, na planície aluvial, ou seja, zona de deposição.

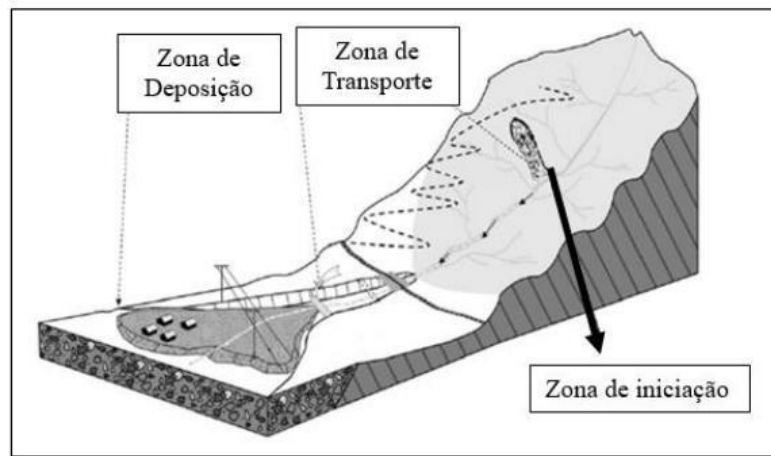


Figura 2: Esquema ilustrativo de fluxo de detritos (Fonte: Hussin, 2011)

Há quatro equações fundamentais para o modelo, sendo que a equação da continuidade para o volume total é:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i \quad (2)$$

A equação da continuidade para determinação do fluxo na k -ésima posição da partícula i é:

$$\frac{\partial C_k h}{\partial t} + \frac{\partial C_k h u}{\partial x} + \frac{\partial C_k h v}{\partial y} = i_k \cdot C^* \quad (3)$$

A equação de conservação de momento nas direções x e y é:

$$\frac{\partial(u,v)}{\partial t} + u \frac{\partial(u,v)}{\partial x} + v \frac{\partial(u,v)}{\partial y} = g \cdot \text{sen}\theta_{(x,y)} - \frac{\tau_{(x,y)}}{\rho_f h} \quad (4)$$

E a equação que avalia as deformações no leito é:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i = 0 \quad (5)$$

onde h é a altura do fluxo; u e v são as velocidades nas direções x e y , respectivamente; i é a taxa de deposição/erosão; t é o tempo de simulação; C_k é a concentração de sedimentos por volume do fluxo na célula k ; z é a elevação do leito; θ_x e θ_y são as declividades nas direções x e y , respectivamente; C^* é a concentração de sedimentos no leito móvel; e τ_x e τ_y são as tensões de cisalhamento nas direções x e y , respectivamente.

Aplicação do Kanako-2D

Foram simulados três cenários para a área de iniciação do fluxo de detritos, a partir dos resultados de instabilidade obtidos com o Shalstab. O primeiro cenário considerou que apenas a área da margem superior da bacia gera o fluxo de detritos, o segundo cenário considerou apenas a região central da bacia como a geradora e o terceiro cenário considerou ambas, com o movimento

de massa iniciando no mesmo momento. Os parâmetros utilizados foram os mesmos para todos os cenários (Tabela 2), sendo considerados os valores já apresentados originalmente pelo modelo, já disponíveis a partir do download pelo site <http://www.stc.or.jp/10soft/003Eframe.html>, com exceção do ângulo de atrito interno (φ). Para a obtenção de φ , foi utilizado o método apresentado anteriormente no item da aplicação do Shalstab.

Tabela 2: Parâmetros utilizados nas simulações com o Kanako-2D.

Parâmetro	Valor
Massa específica do leito móvel (ρ_s)	2650 kg/m ³
Massa específica da fase fluida (ρ_w)	1000 kg/m ³
Concentração da camada móvel	0,65 m ³ /m ³
Coeficiente da taxa de erosão	0,0007
Coeficiente da taxa de deposição	0,05
Diâmetro médio das partículas (D)	0,45 m
Ângulo de atrito interno (φ)	23°
Profundidade mínima do fluxo (z)	0,01 m
Profundidade mínima na frente do fluxo (z_i)	0,01 m
Concentração de sedimentos (c)	0,5 m ³ /m ³

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a aplicação do Shalstab, chegou-se às áreas de instabilidade indicadas na Figura 3a, considerando o limiar de estabilidade como $\log\left(\frac{q}{T}\right) = -2,8$. As áreas identificadas como incondicionalmente instáveis correspondem a regiões de paredões, onde é impossível ocorrer movimentos de massa devido à ausência de solo. Portanto, as áreas utilizadas para a delimitação das cicatrizes foram as classificadas como instáveis (Figura 3b).

Uma vez delimitadas as cicatrizes, calculou-se o hidrograma para os cenários 1 e 2, sendo possível aplicar o Kanako-2D em seguida. Os resultados são apresentados na Figura 4. Os resultados demonstram que o fluxo se espalha no exutório da sub-bacia, e uma parte da massa chega na direção montante do rio principal, isto é, no Rio do Boi. Os processos erosivos ocorrem na maior parte do percurso da descida do curso d'água.

No cenário 1, o fluxo à montante chega a 53 m e à jusante, a 116 m. Já no cenário 2, o fluxo à montante chega a 52 m e à jusante, a 100 m.

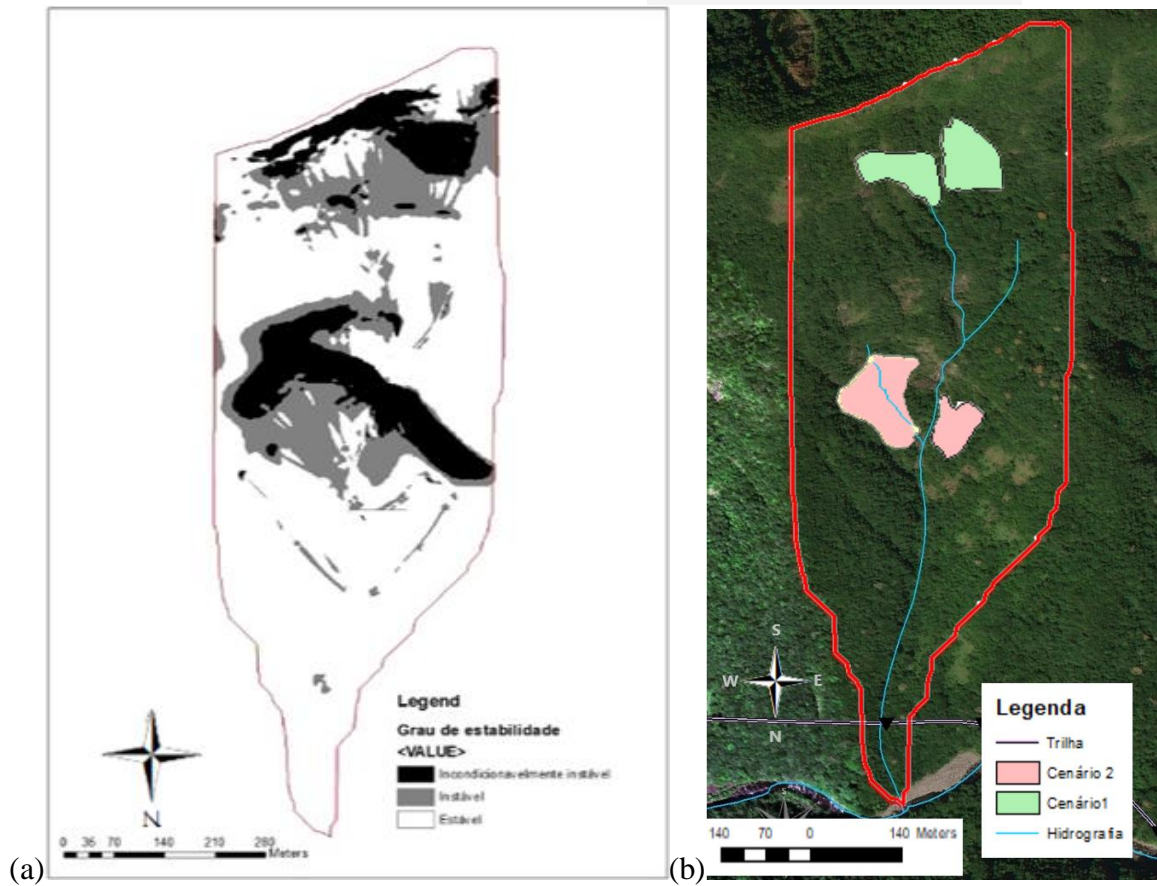


Figura 3: Mapa de áreas instáveis: (a) resultado do grau de estabilidade com o Shalstab, (b) áreas consideradas como cicatrizes no Kanako-2D.

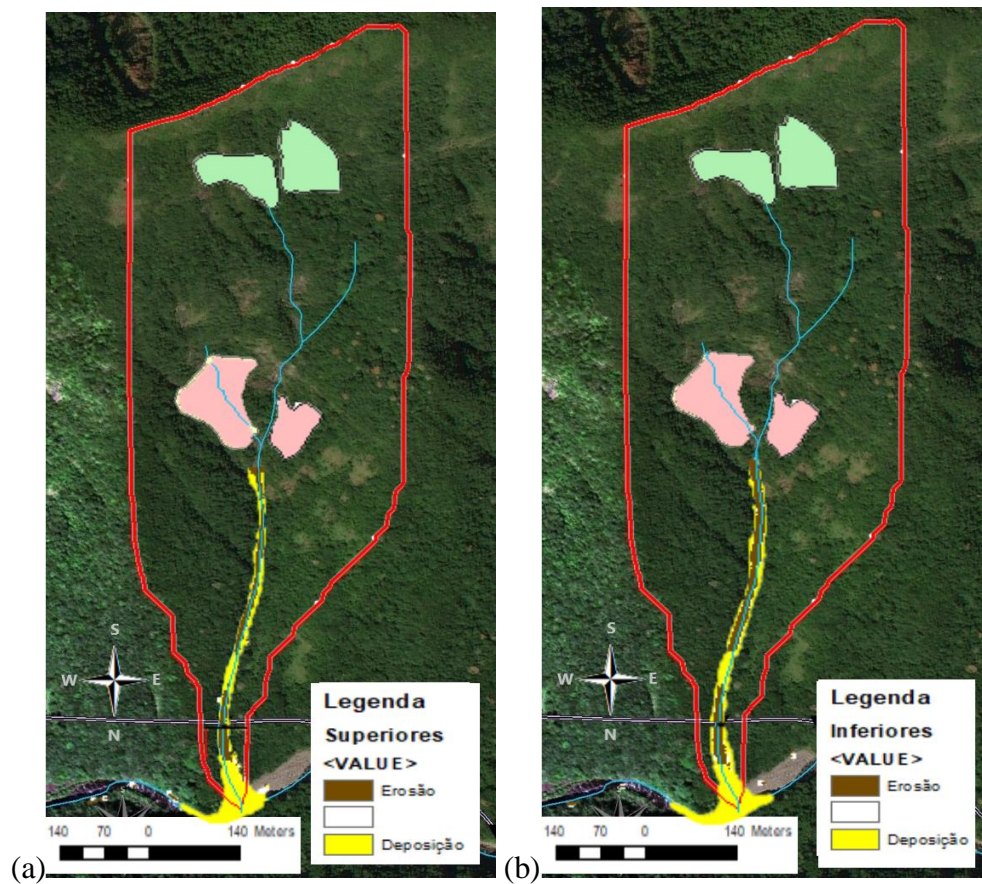


Figura 4: Fluxo de detritos simulado com Kanako-2D:(a) cenário 1; e (b) cenário 2.

Para a simulação do cenário 3, colocou-se um ponto de controle na simulação do cenário 1, onde o fluxo de detritos se juntaria ao do cenário 2. Dessa forma, gerou-se um hidrograma no ponto de confluência entre os dois fluxos e, posteriormente, somou-se o hidrograma do cenário 2 com o do ponto de controle, gerando um novo para o cenário 3, o qual foi aplicado no Kanako-2D. Seu resultado encontra-se na Figura 5. Nesse cenário, o fluxo à montante chegou a 77 m e à jusante, a 670 m.

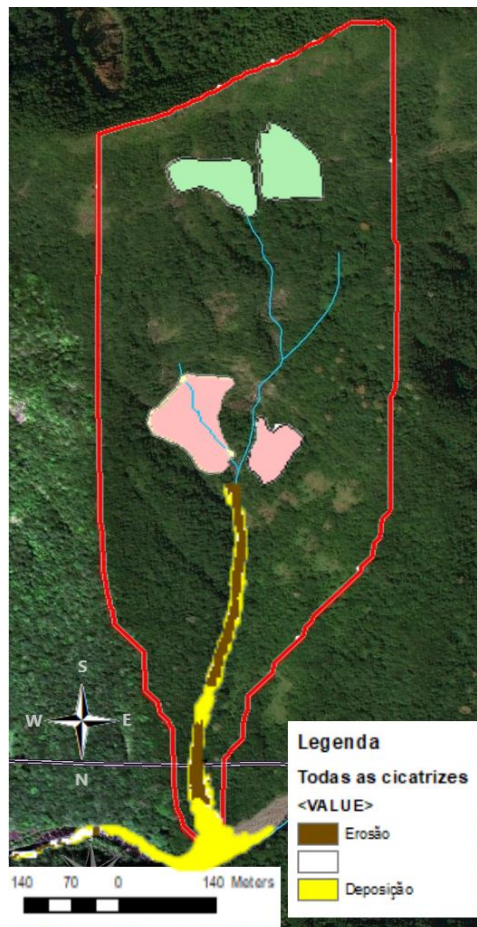


Figura 5: Fluxo de detritos no cenário 3.

Através das simulações, evidencia-se o tempo que o fluxo de detritos de cada cenário leva para atingir a trilha e a distância máxima a partir da origem que ele percorre (Tabela 3). A maior taxa de erosão ocorreu no cenário 3, onde o volume do fluxo de detritos é muito maior. Com esses valores, entende-se que a velocidade do fluxo de detritos nesses casos varia de 2,10 a 3,84 km/h. Como não há muito tempo após a ocorrência e devido ao valor elevado da velocidade do fluxo, o setor de turismo, responsável pelas atividades dos turistas e, logo, pela sua segurança, precisa desenvolver um sistema de segurança melhor, que permita que os mesmos consigam escapar do fluxo de detritos apesar do pouco tempo para tal fuga.

Tabela 3: Resultados do Kanako-2D

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Volume (m ³)	13123	14142	27265
Tempo até a trilha (min)	4 a 5	2,5 a 3	2 a 2,5
Distância máxima percorrida (km)	0,70	0,69	1,28
Velocidade média (km/h)	2,11	2,10	3,84

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de analisar o risco enfrentado pelos turistas ao cruzarem a trilha do Rio do Boi, o presente trabalho realizou o mapeamento de perigo de deslizamentos de encostas com o Shalstab e o fluxo de detritos que será gerado posteriormente com o Kanako-2D.

Os resultados apresentados podem ter uma margem de erro considerável, devido às inúmeras imprecisões e simplificações adotadas na metodologia, sendo algumas delas: estimativa dos parâmetros do solo, desconsideração dos parâmetros da vegetação e imprecisão do MDT. No entanto, mesmo com a imprecisão, o estudo serve como referência para primeiras medidas de segurança, sendo sugerida a aplicação da mesma metodologia ao longo da trilha no resto da Bacia Hidrográfica do Rio do Boi.

Os resultados obtidos permitem concluir que o tempo mínimo para o fluxo de detritos atingir a trilha se dá no cenário 3, sendo de 2 minutos. Em matéria de segurança para turistas, este tempo é bem curto, sendo de extrema importância que não se perca nenhum segundo até o início da fuga do fluxo. Para isso é necessário, além do mapa de área livre da ocorrência de fluxo de detritos, um sistema de alerta ágil e eficaz. Como os deslizamentos aqui estudados ocorrem apenas após elevadas precipitações, uma medida interessante de prevenção a desastres é a interdição da trilha em caso de chuvas intensas, evidenciando a importância do monitoramento meteorológico.

AGRADECIMENTOS

O primeiro, o segundo e o terceiro autor agradecem pelas bolsas à FAPERGS, UFRGS e CNPq, respectivamente. O presente estudo foi financiado parcialmente pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa Pró-Recursos Hídricos, Chamada nº 16/2017, Código: 88881.144918/2017-01.

REFERÊNCIAS

- BRASIL (2018). “*Brasil é referência mundial em ecoturismo*”. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/turismo/2018/07/brasil-e-referencia-mundial-em-ecoturismo>>
- HUSSIN, H. Y. (2011). “*Probabilistic Run-out Modeling of a Debris Flow in Barcelonnette, France*”. Dissertação de Mestrado em Ciências da Terra Aplicadas, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, 107 p.
- KOBIYAMA, M.; MICHEL, R.D.L. (2019). “*Debris-flow hazard investigation with Kanako-2D in a rural basin, Alto Feliz municipality (Brazil)*” in de 7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation (2019: Golden), pp.338-345.
- MELO, C.M.; KOBIYAMA, M. (2018). “*Aplicação do modelo SHALSTAB no estudo de escorregamentos no Brasil: Revisão*”. Revista Brasileira de Geomorfologia 19, pp.721-738.
- MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M. (2016). “*Mapeamento de áreas susceptíveis a fluxos de detritos por meio de modelagem computacional*”, in *Planejamento e gestão territorial: Hidrografia e sustentabilidade*. Org. por Ladwig, N.I.; Schwalm, H. InsularFlorianópolis, pp.71-89.
- MICHEL, G.P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F. (2015). “*Effectiveness analysis of small artificial reservoir for reducing sediment delivery due to debris flow with KANAKO model*” in Proceedings de 6th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation (2015, Tsukuba/Japão), pp.119.
- MONTGOMERY, D.R.; DIETRICH, W.E. (1994). “*A physically-based model for topographic control on shallow landsliding*”. Water Resources Research 30(4), pp.1153-1171.
- NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. (2008). “*Development of “Kanako 2D (Ver.2.00),” a user-friendly one- and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface*”. International Journal of Erosion Control Engineering 1, pp.62-72.
- PAIXÃO, M.A.; KOBIYAMA, M. (2017). “*Efeito do tamanho dos sedimentos sobre a área atingida por fluxos de detritos: Estudo de caso da bacia do arroio Böni, Serra Gaúcha*”. Ciência e Natura 39(2), pp.299-307.
- SANTOS, H. G. dos; CARVALHO, W.; DART, R. de O.; AGLIO, M. L. D.; SOUSA, J. S. de; PARES, J. G.; FONTANA, A.; MARTINS, A. L. da S.; OLIVEIRA, A. P. de. (2011). “*O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada*”. Embrapa Solos. Rio de Janeiro - RJ. 67 p.
- SILVA, J. P.; SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P. (2012) “*Aplicação de dois métodos físico-matemáticos para avaliação do índice de estabilidade das vertentes da Bacia do Rio Ribeirão/Paranaguá-PR*”. Revista Geonorte, Edição Especial, 4(2), pp.1291 – 1302.