

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

RECONSTRUÇÃO E ANÁLISE DE UM FLUXO DE DETRITOS POR MEIO DE DADOS DE CAMPO E DO MODELO KANAKO-2D NO MUNICÍPIO DE GASPAR/SC.

Esdras C. Villela¹ & Masato Kobiyama²

RESUMO – A modelagem computacional constitui a principal ferramenta na elaboração de mapas de perigo de desastres hidrológicos, como os fluxos de detritos. Este trabalho tem como objetivo realizar a reconstrução e análise do fluxo de detritos comparando os dados de campo com a avaliação e sensibilidade do KANAKO-2D, através do estudo de caso no município de Gaspar (SC). O fluxo de detritos em questão teve alcance de cerca de 650 m, mobilizando um volume total de 24.827 m³. Pequenas variações nos valores da configuração do sistema a ser modelado do KANAKO-2D repercutiram de forma moderada na propagação do fluxo, como o aumento do seu alcance total e a expansão da sua área total. O relevo, representado pelo Modelo Digital do Terreno, é o sistema a ser modelado, e por isso, as características do MDT são imperativas em relação ao comportamento do modelo. A acuracidade da modelagem do KANAKO-2D para este evento foi quantificada em 65%, primeiramente pela dificuldade da reconstrução do relevo original e, secundariamente, pela utilização de alguns parâmetros padrões do programa. Para maior assertividade na modelagem do KANAKO-2D recomenda-se a elaboração prévia de Modelos Digitais do Terreno de alta resolução e a realização de ensaios geotécnicos por microbacias.

ABSTRACT– Computational modeling is the main tool in the preparation of hazard maps of hydrological disasters, such as debris flows. This work aims to evaluate perform the reconstruction and analysis of the debris flow comparing the field work data with the evaluation and sensitivity of KANAKO-2D, through the study case of this phenomenon in the municipality of Gaspar (SC). The debris flow in question reached a range of about 650 m, mobilizing a total volume of 24,827 m³. Small variations in KANAKO-2D input parameters had a moderate effect on flow propagation, such as increasing its total range and expanding its total area. The relief represented by the Digital Elevation Model, is the system to be modeled, thus the characteristics of the DEM are imperative in relation to the model behavior. The accuracy of KANAKO-2D modeling for this event was quantified at 65%, primarily due to difficulty in reconstructing the original relief and, secondly, due to the use of standard program parameters. For greater assertiveness in the modeling of KANAKO-2D, it is recommended the prior elaboration of high resolution Digital Terrain Models and geotechnical tests in micro-basins.

Palavras-Chave – Fluxo de detritos, KANAKO-2D.

1) Afiliação: Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais, Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina. R. Eng. Agrônomo Andrei Cristian Ferreira, s/n, CEP 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil (esdrasvillela@gmail.com).

2) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hídricas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil (masato.kobiyama@ufrgs.br).

1. INTRODUÇÃO

Os fluxos de detrito (Takahashi, 2007) são fenômenos hidrológicos complexos devido ao caráter transitório da fluidez do material. São movimentos de massa governados pela gravidade e compostos pela mistura de água, ar e sedimentos, correndo por canais estreitos a altas velocidades (Hung *et al.*, 2014). A ocorrência de fluxos de detritos em regiões montanhosas do Brasil, como no Vale do Itajaí/SC (Herrmann, 2014), coloca em evidência o alto poder destrutivo deste fenômeno natural.

A modelagem computacional surgiu como principal ferramenta na elaboração de mapas de perigo de fluxos de detritos. Tornou-se imperativo, portanto, o entendimento e validação de programas como o KANAKO-2D, desenvolvido no Japão por Nakatani *et al.* (2008). O KANAKO-2D é uma modelagem numérica computacional para a simulação dinâmica da propagação de fluxo de detritos e já tem sido aplicado em regiões subtropicais brasileiras com bons resultados (Michel *et al.*, 2015; Kobiyama *et al.*, 2018). As equações básicas do modelo são dadas por Takahashi e Nakagawa (1991).

Este trabalho tem como objetivo realizar a reconstrução e análise do fluxo de detritos comparando os dados de campo com a avaliação e sensibilidade do KANAKO-2D através do estudo de caso no município de Gaspar (SC). O fluxo de detritos em questão é composto por dois eventos parcialmente sobrepostos ocorridos em dias consecutivos, sendo ambos considerados na modelagem. Os resultados deste trabalho poderão ser aplicados no planejamento municipal rural e urbano de Gaspar, bem como nas muitas regiões análogas do Brasil.

2. ÁREA, MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O fluxo de detritos escolhido para o presente estudo está localizado na porção norte do município de Gaspar (SC), na região do Vale do Itajaí, sob as coordenadas geográficas 26°47'40,75" S e 49°1'21,45" O (Figura 1). O endereço oficial da área afetada pelo deslizamento é Rua Emilio Roweder, 2000, CEP 89114-442, Gaspar, SC.

O primeiro evento de fluxo de detritos foi deflagrado no dia 04 de dezembro de 2008, e o segundo evento no dia seguinte, ambos no período da manhã. Nos dias dos eventos não houve precipitação, entretanto, a precipitação acumulada no mês de novembro havia batido o recorde na região do Vale do Itajaí, chegando a 1.002 mm, com o pico de concentração das chuvas dez dias antes do evento em questão (Dias, 2008).

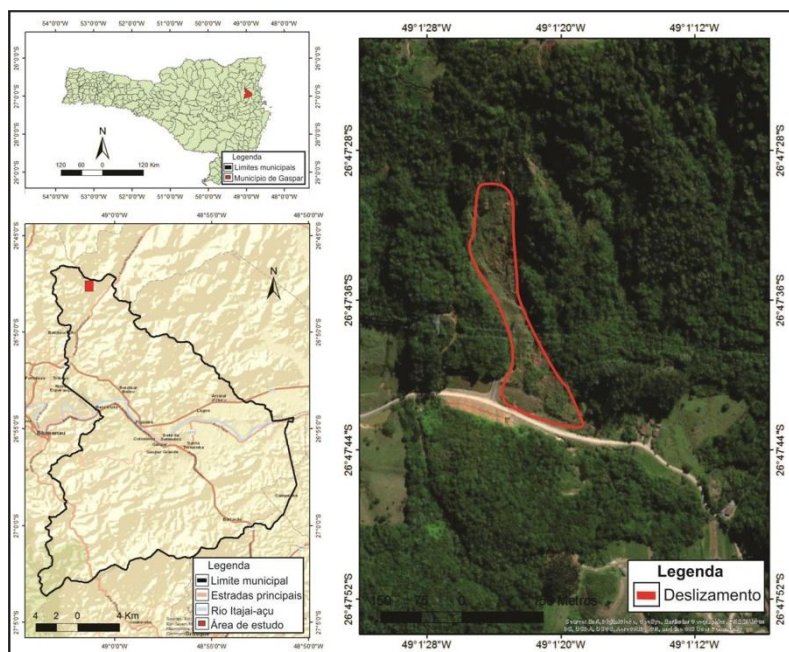


Figura 1. Localização da área de estudo.

O Vale do Itajaí, onde a área de estudo está inserida, é a região com maior registro de movimentos de massa em Santa Catarina (Dias, 2008). Ela é categorizada, geomorfológicamente, como pertencente ao grande sistema montanhoso da Serra do Mar (Dias, 2008), sendo localmente esculpida nas rochas gnáissicas do Complexo Granulítico de Santa Catarina (CPRM, 2014). O relevo predominante é o de morros com encostas extensas, inclinadas e predominantemente côncavas, com topos suaves dissecados por drenagens e encobertos por densa vegetação. O topo do morro em que o deslizamento ocorreu apresenta cota de 440 m e a sua base 200 m.

2.2. Dados utilizados

Os dados utilizados na modelagem do KANAKO-2D foram obtidos conforme segue. As dimensões do fluxo de detritos (volume, largura e comprimento), as dimensões dos blocos rochosos (diâmetro) e a profundidade do solo, foram adquiridas em campo com o auxílio de GPS, trena métrica e furos de sondagem. Como complemento para a reconstrução dos eventos, utilizou-se o testemunho dos moradores, imagens aéreas do Google Earth e fotografias aéreas capturadas de helicóptero.

Para obtenção dos parâmetros geotécnicos do solo massa específica (NBR6508; ABNT, 1984) e ângulo de atrito (D3080; ASTM, 2004) foram utilizadas as amostras deformadas e indeformadas coletadas em campo em solo não mobilizado, e os ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina.

A propagação do fluxo de detritos no KANAKO-2D ocorre por meio da entrada em um canal, representada pela teoria do hidrograma triangular de Whipple (1991). A descarga de pico e o período de pico do hidrograma foram calculados a partir da fórmula proposta por Rickenmann (1999).

Para os demais parâmetros de entrada utilizados foram adotados os valores padrões do KANAKO-2D, ou a média dos valores extremos estabelecidos na literatura (Costa, 1988), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de entrada utilizados na modelagem do KANAKO-2D.

Parâmetro	Unidade	Valor Evento 1	Valor Evento 2
Densidade de massa da camada ¹	kg/m ³	2630	2630
Densidade de massa da fase fluida ²	kg/m ³	1100	1100
Concentração da camada móvel ³	m ³ / m ³	0,65	0,65
Coefficiente de rugosidade de Manning ³	s/m ^{1/3}	0,03	0,03
Coefficiente da taxa de erosão ³	-	0,0007	0,0007
Coefficiente da taxa de deposição ³	-	0,05	0,05
Diâmetro do material ¹	m	1,25	0,75
Ângulo de atrito interno ¹	°	27,5	27,5
Profundidade mínima do fluxo ¹	m	0,01	0,01
Concentração do material ²	m ³ / m ³	0,6	0,6
Volume dos sedimentos ⁴	m ³	13.725	11.102
Descarga de pico ⁴	m ³ /s	230,6	185,1
Período de pico ⁴	s	30,8	28,3

¹Medido em campo/ensaio geotécnico; ²Média de condições extremas; ³Padrão do KANAKO-2D; ⁴Calculado.

Uma das principais bases para o modelo de propagação de fluxos de detritos é o dado topográfico, o qual foi obtido a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) da área com pixel de 1 m e resolução espacial de 39 cm, elaborado pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina de 2011. Tendo o fluxo de detritos em questão ocorrido em 2008 foi necessária a modificação do MDT para reconstrução do relevo original pré-evento. Após a modelagem do primeiro evento, somou-se o resultado do fluxo com o MDT do relevo original para a modelagem do segundo evento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização do fluxo de detritos

O movimento de massa analisado neste trabalho consiste em dois eventos de fluxo de detritos parcialmente sobrepostos e ocorridos em dias consecutivos (04 e 05/dez/2008), ambos iniciados por

deslizamentos translacionais rasos (Hungar *et al.*, 2014), o que é uma associação comum em desastres hidrológicos (Kobiyama *et al.*, 2010).

A Figura 2 apresenta um croqui esquemático do corpo do fluxo de detritos, distinguindo as áreas do primeiro e segundo eventos. O primeiro evento soterrou a estrada próxima à encosta, derrubou uma grande torre de energia, preencheu a depressão existente do outro lado da estrada, e a borda leste do fluxo atingiu um dos cantos de uma casa nas proximidades (Figura 2).

O segundo evento ocorreu mais a leste do primeiro e, apesar de possuir menor magnitude, teve maior alcance, uma vez que a depressão do terreno já havia acomodado o material do primeiro evento. A casa supracitada foi completamente soterrada, e o fluxo terminou lateralmente em contato com um lago no mesmo terreno (Figura 2).

Os fluxos eram compostos majoritariamente por sedimentos areno-argilosos, além de muitos troncos de árvores e blocos rochosos. A média dos blocos do primeiro evento é de 1,25 m enquanto no segundo evento é de 0,75. A diferença de tamanhos de blocos deve ser atribuída a magnitude dos eventos, considerando que eventos de maior magnitude pode transportar blocos de maior dimensão.

O fluxo de detrito como um todo foi dividido em três zonas geomorfológicas (Figura 2): iniciação, transporte e deposição (Nunes e Sayão, 2014), com gradientes de inclinação de 24,4°, 9,7° e 6,1°, respectivamente. A zona de transporte é caracterizada por um canal íngreme, com direção e largura constantes, típico de ocorrências de fluxo de detritos (Takahashi, 2007).

O comprimento total do fluxo é de cerca de 650 m, com uma área total atingida de 38.300 m², mobilizando um volume total de 24.827 m³ (13.725 m³ e 11.102 m³ no primeiro e segundo eventos, respectivamente).

O principal fator deflagrador do primeiro evento investigado foi a geometria acentuada do talude, os baixos índices de resistência ao cisalhamento do solo e, principalmente, pelos altos níveis de precipitação acumulada (Dias, 2008). O segundo evento ocorreu pela remoção de massa lateral causada pelo primeiro evento. Em ambos os casos, o rebaixamento rápido do freático e a erosão lateral por meio das drenagens existentes podem ter acelerado o processo desencadeador do fluxo de detritos (Guidicini e Nieble, 2008).

Figura 2. Croqui esquemático com a delimitação da área afetada pelo primeiro e segundo eventos de fluxo de detritos, com ênfase na zona de deposição.

3.2. Assertividade do modelo KANAKO-2D

Após a reconstituição dos fluxos de detritos estudados e a obtenção dos parâmetros de entrada do KANAKO-2D (Tabela 1), realizou-se a modelagem computacional, cujo resultado pode ser observado na Figura 3. A modelagem do KANAKO-2D apresentou a propagação do fluxo de

detritos desde a zona de transporte até a zona de deposição, indicando uma área total afetada de 24.458 m². A área realmente afetada pelo fluxo de detritos foi de 17.200 m².

O índice de acerto da modelagem do KANAKO-2D em relação ao delimitado em campo e por imagens aéreas é de 65%, considerando o primeiro e segundo eventos como um todo. Apesar de apresentar um resultado satisfatório em termos gerais, a modelagem subestima o alcance do fluxo e superestima a área da zona de transporte (Figura 3).

O fator de erro na modelagem neste caso de estudo se deve primeiramente pela dificuldade da reconstrução do relevo original e, secundariamente, pela utilização de parâmetros padrões do programa e pela variação da espessura do solo, que é tratada de forma homogênea pela modelagem.

Para maior assertividade na modelagem do KANAKO-2D recomenda-se a elaboração prévia de Modelos Digitais do Terreno de alta resolução (pixel mínimo de 0,50 m) e a realização de ensaios geotécnicos por microbacias. Importante destacar que o KANAKO-2D somente suporta a quantidade máxima de pixels de 499 no eixo x e y do MDT, portanto, em casos de fluxos de detritos de pequenas proporções é aconselhado uso de menores pixels e para fluxos de maior proporção utilizar pixel maiores. Neste trabalho foi verificado que nos pixels de 0,5 m a 5 metros não houve grandes variações na direção do fluxo, contudo, para valores maiores mudanças na direção do fluxo começam a ser significativas.

Figura 3. Comparação entre a modelagem do KANAKO-2D e a delimitação da área realmente afetada pelo fluxo de detritos.

3.3. Sensibilidade do modelo KANAKO-2D aos parâmetros de entrada

Algumas variações dos valores dos parâmetros de entrada do KANAKO-2D foram testados, em termos de comparação com a modelagem realizada para este caso de estudo, visando analisar a sensibilidade do modelo às diferentes variáveis.

Com a diminuição da densidade da fase fluida do modelo de 1.100 kg/m³ para 1.000 kg/m³, constatou-se também uma diminuição moderada no alcance total do fluxo (Figura 4A), em concordância com os resultados de Paixão (2017). Já o aumento para 1.200 não apresentou variações significativas.

A concentração da camada móvel considerada 0,65 m³/m³ no modelo, quando diminuída para 0,4 m³/m³ aumentou a extensão do fluxo e modificou completamente as áreas de deposição e erosão (Figura 4B).

O diâmetro médio do material (detritos), considerado 1,25 m na modelagem do primeiro evento, quando diminuído para 0,75 m e 0,25 m acarreta em um maior espalhamento da zona de transporte, bem como aumenta a espessura de deposição (Figura 4C).

A variação da concentração do material, em relação ao valor utilizado no modelo de $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^3$, teve resposta significativa. A diminuição para $0,44 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ocasionou o aumento das taxas de erosão e deposição, enquanto o aumento para $0,77 \text{ m}^3/\text{m}^3$ teve o efeito contrário, diminuindo a mobilização de material (Figura 4D).

Foram ainda testados valores maiores para o volume do fluxo, estabelecido como 13.725 m^3 para o primeiro evento. Com valores de 18.620 m^3 e 21.186 m^3 o alcance total do fluxo e a espessura da deposição aumentaram proporcionalmente (Figura 4E).

Entretanto, o relevo, representado pelo Modelo Digital do Terreno, é o parâmetro ao qual o KANAKO-2D apresenta maior sensibilidade, alterando de forma significativa a orientação e velocidade do fluxo, conforme foi constatado nas inúmeras tentativas de reconstrução do relevo original. Por isso, as medidas estruturais de baixo impacto como a alteração do relevo, que pode modificar o percurso do fluxo de detritos, surgem como medida preventiva em áreas de perigo. Devido à sua importância, este tema será abordado em trabalho específico.

Figura 4. Resposta do modelo KANAKO-2D à variações nos parâmetros de entrada: análise do primeiro evento de fluxo de detritos investigado. A) Densidade da fase fluida; B) Concentração da camada móvel; C) Diâmetro médio do material; D) Concentração do material; E) Volume do fluxo;

4. CONCLUSÃO

O fluxo de detritos investigado neste trabalho consistiu em dois eventos parcialmente sobrepostos e ocorridos em dias consecutivos (04 e 05/dez/2008), ambos iniciados por deslizamentos translacionais rasos progredindo para fluxos de detritos. O fluxo em questão teve alcance de aproximadamente 650 m, mobilizando um volume total de 24.827 m^3 de material, incluindo sedimentos areno-argilosos, troncos de árvores e blocos rochosos. O principal fator deflagrador do primeiro evento foram os altos níveis de precipitação acumulada, somada à alta declividade da encosta. O segundo evento ocorreu pela remoção de massa lateral causada pelo primeiro evento.

A acuracidade da modelagem do KANAKO-2D para este evento foi quantificada em 65%, primeiramente pela dificuldade da reconstrução do relevo original e, secundariamente, pela utilização de parâmetros padrões do programa.

Pequenas variações nos valores da configuração do sistema a ser modelado do KANAKO-2D repercutiram de forma moderada na propagação do fluxo, como o aumento do seu alcance total (maior densidade da fase fluida), a expansão da sua área total (menor diâmetro do material e maior volume do fluxo) e o aumento da espessura da deposição (maior volume do fluxo).

O relevo, representado pelo Modelo Digital do Terreno, é o sistema a ser modelado por meio do KANAKO-2D, sendo então as características do MDT imperativas em relação ao comportamento do modelo.

Para maior assertividade na modelagem do KANAKO-2D recomenda-se a elaboração prévia de Modelos Digitais do Terreno de alta resolução (pixel de 0,50 m a 5 m), realização de medições em campo e ensaios geotécnicos por microbacias, para posterior modelagem dos fluxos de detritos utilizando o KANAKO-2D, em associação com outros programas como o SHALSTAB.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). "NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm – Determinação da massa específica". Rio de Janeiro, 1984.
- ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2004). "ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions". Philadelphia, 2004.
- CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (2014). "Mapa geológico do estado de Santa Catarina". Porto Alegre: CPRM, 2014.
- DIAS, M.A.F.S. (2008). "As chuvas de novembro de 2008 em Santa Catarina: um estudo de caso visando a melhoria do monitoramento e da previsão de eventos extremos". EPAGRI. Disponível em: <http://intranetdoc.epagri.sc.gov.br/producao_tecnico_cientifica/DOC_3661.pdf>. Acessado em: julho de 2018.
- COSTA, J.E. (1988). "Rheologic, geomorphic, and sedimentologic differentiation of water clouds, hyperconcentrated clows, and debris clows", in: BAKER, V.R.; KOCHER, R.C.; PATTON, P.C. (eds.) *Flood geomorphology*. New York: John-Wiley & Sons, pp.113-122.
- FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (2009). "Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: Água, gente e política". Fundação Agência de Água de Vale do Itajaí, Blumenau-SC, 192 p.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. (1983). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. São Paulo: Editora Edgard Bliicher Ltda., 194 p.
- HERRMANN, M.L.P. (org.) (2014). *Atlas de Desastres Naturais de Santa Catarina: período de 1980 a 2010*. Florianópolis: Cadernos Geográficos e Instituto Histórico e Geográfico de Santa Catarina, 2ª ed., 217 p.
- HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. (2014). "The Varnes classification of landslide types, an update". *Landslides*, 11, pp. 167-194.
- KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORRÊA, G.P.; MICHEL, G.P. (2010). "Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects", in: WRACHIEN, D.; BREBBIA, C.A. (Ed.) *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III*, pp. 77-88.
- KOBIYAMA, M., MICHEL, R.D.L., PAIXÃO, M.A., MICHEL, G.P. (2018). "Small Fish-pond design for debris flow disaster measure with KANAKO-2D", in: *Symposium Proceedings of the InterPraenent 2018 in the Pacific Rim*, pp. 264-269.
- MICHEL, G.P. (2015). *Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos*. 164 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, RS, Brasil.
- NAKATANI, K.; WADA, T.; SATOFUKA, Y.; MIZUYAMA, T. (2008). "Development of "Kanakano 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(2), pp. 62-72.
- NUNES, A. L.; SAYÃO, A. (2014). "Debris flows e técnicas de mitigação e convivência", in: *14 Congresso Nacional de Geotecnia. Covilhã, Portugal*, pp. 83-123.
- PAIXÃO, M. A.; KOBIYAMA, M. (2017). "Análise de sensibilidade do modelo de fluxos de detritos KANAKO-2D". 98 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, RS, Brasil.
- RICKENMANN, D. (1999). "Empirical relationships for debris flows". *Natural Hazards, Netherlands*, 19, pp. 47-77.
- TAKAHASHI, T. (2007). "Progress in debris flow modeling", in: SASSA, K.; FUKUOKA, H.; WANG, F.; WABG, G. (eds.) *Progress in landslide science*. Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 60-77.
- TAKAHASHI, T.; NAKAGAWA, H. (1991). "Prediction of Stony Debris Flow Induced by Severe Rainfall". *Sabo Gakkaishi*, 44(3), pp. 12-19.
- WHIPPIE, K.X. (1991). "Predicting debris-flow runout and deposition on fans: the importance of the flow hydrograph", *IAHS Publication*, 209, pp. 337-345.