

# Análise Dinâmica do Fluxo de Detritos em Llano de La Piedra, Costa Rica

Ana María Valverde Sancho

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [avalverde@aluno.puc-rio.com.br](mailto:avalverde@aluno.puc-rio.com.br)

Alberto S.F.J. Sayão

PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [sayao@puc-rio.br](mailto:sayao@puc-rio.br)

Anna Laura L.S. Nunes

COPPE-UFRJ, Brasil, [alaura@coc.ufrj.br](mailto:alaura@coc.ufrj.br)

**RESUMO:** Fluxos de detritos são movimentos de massa catastróficos em regiões de topografia montanhosa e precipitação intensa. Tais eventos configuram alto risco para a vida humana e danos a infraestruturas, podendo resultar em importantes perdas econômicas. O principal objetivo deste trabalho foi caracterizar o evento de fluxo de detritos ocorrido em 28 de julho de 1996, na localidade de Llano de la Piedra, Costa Rica. O fluxo de detritos foi ativado por chuvas intensas com um volume inicial de  $40.000\text{m}^3$  de material que percorreu e erodiu o canal do talvegue por 580m. O volume final do fluxo foi estimado em  $100.000\text{m}^3$ , devastando o povoado de Lajas, onde morreram 11 pessoas. O caso histórico foi analisado e calibrado com modelos dinâmicos em 2D e 3D, usando a reologia de Voellmy nos programas numéricos DAN-W e DAN-3D, respectivamente. Os resultados obtidos numericamente foram consistentes com os parâmetros observados no evento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Fluxos de Detritos, Análise Dinâmica, Modelagens Numéricas 2D e 3D.

## 1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são eventos que representam um alto risco de destruição, podendo resultar em importantes perdas sócio-econômicas e danos para a vida humana (Valverde et al, 2016). Os movimentos do tipo fluxo, ou *flow-like landslides*, são considerados os mais destrutivos dentre todos os tipos de movimentos de massa (Hung, 2003). Geralmente ocorrem de forma natural em locais com topografia acidentada e caracterizam-se por atingir altas velocidades e grande área de impacto, razões que tornam sua previsão muito complexa. O início dos movimentos de fluxo está associado com um rápido processo de perda da resistência ao cisalhamento, deflagrado principalmente por episódios extremos de precipitação ou sismos. Os exemplos mais marcantes deste tipo de movimentos de massa

são os fluxos de detritos, os fluxos de terra e as avalanches.

No caso específico da América Latina, as condições geológicas e geotécnicas e o clima tropical contribuem para uma especial vulnerabilidade a estes tipos de movimentos de massa de média a altas velocidades e alto potencial de destruição, como as avalanches e os fluxos de detritos. Além disso, a ocupação desordenada e ilegal das encostas em zonas urbanas favorece uma condição de alto risco de ocorrência de movimentos de massa (Nunes & Sayão, 2014). Note-se que toda a América Latina apresenta elevados índices de movimentos nas encostas com registros altos de mortes.

Os principais desafios no estudo dos fluxos de detritos incluem: delimitar as áreas de risco de instabilidade e calcular a probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente

destruidor. Para isso, deve-se determinar os parâmetros necessários para o eventual projeto de estruturas de proteção, obtendo-se, por exemplo: magnitude e velocidade do movimento, distância percorrida e força de impacto. Devido à complexidade dos movimentos de massa, surgiu a necessidade de se utilizar ferramentas como a modelagem numérica para seu estudo. Porém, pelas características dos fluxos, sua simulação utilizando métodos analíticos ou numéricos é complexa, dependendo do atrito da base do canal de fluxo, da reologia da massa deslizada e da topografia do local analisado, entre outros.

O termo de fluxo de detritos tem sido definido desde o início do século XX por inumeráveis autores. Dentre os primeiros, destaca-se Stiny (1910), que define fluxo de detritos como uma torrente escoando em uma montanha carregando sólidos suspensos e transportando determinada quantidade de massa erodida. Como a quantidade de massa transportada aumenta, em determinado momento ela se transforma em uma massa viscosa contendo água, solo, areia, rocha e madeira misturadas. Na mais recente classificação de movimentos de massa de Hungr et al (2014), os fluxos de detritos são definidos como um fluxo com velocidades muito rápidas a extremamente rápidas, composto por detritos saturados em um canal íngreme com forte arraste de material e água ao longo do canal. Este movimento diferencia-se de outros movimentos de massa, pois acontece ao longo de canais estabelecidos periodicamente.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DO EVENTO

O caso de estudo se localiza no bairro El Llano de la Piedra, entre as localidades *Santa Maria de Dota* e *San Marcos de Tarrazú*. A área de estudo localiza-se na parte alta da *Ravina Concha* e o *Rio Mesa*.

A zona onde aconteceu o movimento pertence à formação geológica *Caraigres* e caracteriza-se pela presença de rochas sedimentares (arenitos e argilitos). Estas rochas formam solos residuais lateríticos (siltes

argilosos vermelhos) com espessuras entre 2,0 e 10,0m.

Bermudez (1997) reporta que, na primeira capa do perfil do solo, encontra-se um material vermelho com muitas raízes e espessura variando até 2,7m. Em seguida há um silte arenoso de cor vermelho-amarela entre as profundidades de 1,5 a 4,0m. Depois, encontra-se uma camada de silte-argiloso com estruturas de rocha alterada de 2,5 até 7,0m de profundidade. No quarto estrato, ocorre rocha alterada com presença de material arenoso e alguns blocos de rocha sã. Este estrato encontra-se entre 7,0 e 24,0m. Finalmente, a última camada apresenta rocha pouco alterada e rocha sã. A zona de transporte com o material erodido no canal é mostrada na Figura 1a.

O pé do talude consiste em uma zona de depósitos de coluviões (Figura 1b), devido à acumulação de detritos de eventos anteriores. O *Rio Pirrís* encontra-se na base do talude e, portanto, a zona de deposição é de origem colúvio-aluvial, produto da combinação dos materiais provenientes do rio e da encosta.



Figura 1. Fluxo de detritos, *Llano de la Piedra*: (a) Material erodido no canal; (b) Material na zona de deposição.

O dia 27 de julho foi o mais chuvoso em 1996 na área do *Llano de la Piedra*, com 271mm de chuva registrados na estação pluviométrica próxima do local do evento. Em consequência, o fluxo de detritos foi desencadeado no dia seguinte.

Em 1955, outro fluxo de detritos com magnitude similar ocorrera no local, mas são poucos os registros e documentos daquele evento. No segundo evento, estudado nesta pesquisa, a água infiltrada nas fraturas do maciço, elevou as poropressões, reduzindo a resistência do material da encosta.

O movimento iniciou-se na cota 1.660m, onde um grande bloco de material deslizou e parte dele ficou no setor médio da encosta devido às condições topográficas do local, como mostra a Figura 2a. O evento pode ser caracterizado como um movimento rotacional típico no topo da encosta, seguido por um fluxo de detritos que erodiu o canal e espalhou-se na zona de deposição (Figura 2b).

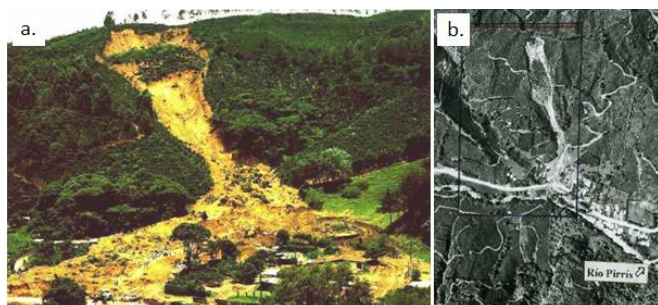


Figura 2. Fluxo de detritos de Llano de la Piedra: (a) Vista frontal; (b) Vista aérea.

O fluxo de detritos atingiu praticamente todas as camadas de solo residual, mobilizando até a quarta camada de rocha alterada. A permeabilidade desta camada é alta, o que favoreceu a infiltração de água. O evento resultou na morte de 11 pessoas, e na destruição de 7 casas e infraestrutura pública.

A topografia antes do evento foi obtida da base topográfica disponibilizada pelo CENIGA (1998), levantada com escala de 1:25000. A partir desta informação foi gerado um modelo de elevação digital através do programa ArcGIS V.10, obtendo-se o perfil do canal percorrido pelo fluxo de detritos (Figura 3).

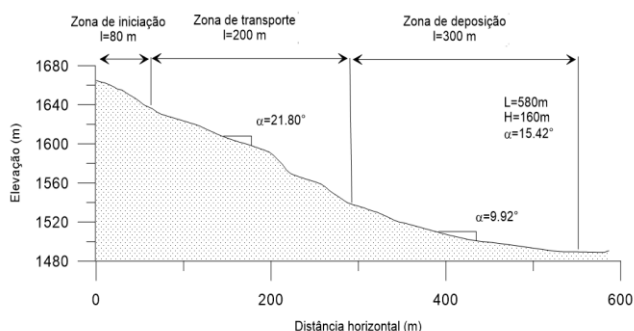


Figura 3. Perfil e parâmetros geométricos do evento de Llano de la Piedra.

A superfície de ruptura foi determinada

mediante ensaios de refração sísmica e topografia a cada metro, realizados após o evento. A partir destes resultados e observações de campo, estimou-se que o material rompido tem uma espessura média de 15m e um volume inicial de  $40.000m^3$  e volume final de  $100.000m^3$ . A distância percorrida foi medida em 580m e a extensão de deposição em 300m.

Não foram estimadas velocidades do evento, mas os moradores da área contam que a rapidez do fluxo não permitiu que várias pessoas fugissem, embora tendo percebido que o material se aproximava do local. Assim, estimou-se que o movimento ocorreu com velocidades rápidas a muito rápidas. A distância percorrida foi medida desde a zona de iniciação do movimento até o ponto mais distante atingido pelo fluxo. A massa foi deslocada por um único canal até atingir o Rio Pirris.

### 3 MODELAGEM NUMÉRICA

As retroanálises do fluxo de detritos *Llano de la Piedra* foram realizadas por meio de simulações numéricas com os programas DAN-W (Hung, 1995) e DAN3D (McDougall, 2006), desenvolvidos pela *University of British Columbia* no Canadá. O DAN-W e o DAN3D são programas criados para a modelagem prática de movimentos de massa, empregando uma quantidade mínima de parâmetros que requerem calibração.

Os programas foram desenvolvidos baseados em uma abordagem semi-empírica. O caráter empírico se justifica pelo fato do programa requerer a calibração de eventos anteriores e o caráter analítico se deve pela utilização de diferentes soluções analíticas para avaliar as propriedades dos materiais e os mecanismos do movimento. Esta abordagem semi-empírica é baseada no conceito de “fluxo equivalente” definido por Hung (1995), no qual a heterogeneidade e complexidade dos materiais são reduzidas a um material hipotético governado por relações reológicas.

A continuidade do modelo é assegurada pelo balanço de massa. O modelo DAN-W assegura a continuidade através de um sistema de blocos

deformáveis de volume fixo, interpolando a partir de funções de suavização (*smoothing functions*). O volume de controle é de forma trapezoidal, representando o material carregado entre cada coluna de referência.

Por outro lado, o DAN3D adota o método numérico de SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*), que não utiliza malha e é baseado em formulações lagrangianas (Liu & Liu, 2010). Este método divide o volume total em partículas distribuídas em colunas de referência que podem incrementar seu volume devido ao arraste.

O material em movimento e o material da base podem ser governados por reologias diferentes. No caso destes programas, a reologia interna é assumida sempre como de atrito, governada pelo ângulo de atrito, e a reologia da base é uma combinação das reologias de atrito, turbulenta e viscosa, que atuam na base do movimento. Tem sido muito utilizada a reologia de Voellmy, que combina os modelos de atrito e turbulência. Ela permite uma representação mais real do fenômeno, visto que geralmente os movimentos de massa consistem de um material mais rígido que flui sob um material que possui maior mobilidade (Hung & McDougall, 2009).

Ambos os modelos permitem considerar o material erodido pela passagem do fluxo no canal na modelagem. O programa DAN-W simula o material de arraste por meio da profundidade de erosão. Desta forma, o programa determina a taxa de erosão levando em conta a profundidade de fluxo e a velocidade para cada ponto do movimento. O DAN3D simula o material de arraste por meio da taxa de erosão estabelecida como dado de entrada, que pode ser obtida por tentativa e erro.

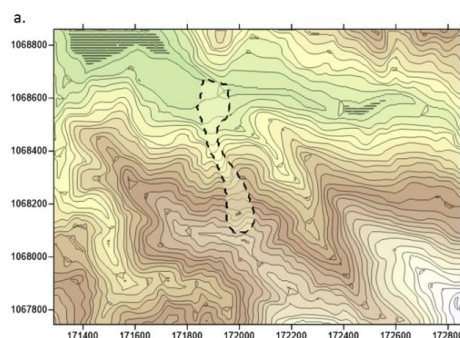
#### 4 CALIBRAÇÃO NUMÉRICA

O evento de *Llano de la Piedra* foi um escorregamento rotacional na parte alta da encosta que atingiu um depósito pretérito de coluvião e foi transformado em um fluxo de detritos. A modelagem utilizou a reologia de atrito na parte inicial e a reologia de Voellmy na zona do fluxo de detritos.

Para simular a parte inicial do movimento foi utilizada uma rotina numérica do DAN3D chamada Dan3D Flex, que permite considerar a condição do movimento de uma massa coerente em um plano de deslizamento da base, sem a presença de pressões laterais (Aaron & Hung, 2016). Assim, a massa inicial é tratada como um bloco rígido que se desloca e se transforma em fluido, a partir de uma distância indicada ao programa. O Dan3D Flex foi utilizado para obter uma melhor simulação da parte inicial do movimento e um melhor ajuste da zona de deposição do material.

A zona de transporte e de deposição foram modeladas com a reologia de Voellmy, indicada para a análise de fluxos de detritos (Hung et al, 1998; Ayotte & Hung, 2000; McDougall, 2006; McKinnon et al, 2008; Pelizoni, 2014; Nunes & Sayão, 2014; Xavier Silva, 2015). O modelo com a reologia de Voellmy baseia-se nos coeficientes de atrito e de turbulência.

As análises de sensibilidade para a calibração preliminar foram executadas com o módulo SENSAN do pacote de estimativa de parâmetros PEST (Doherty, 2010), existente em versão do DAN3D modificada para calcular os parâmetros de calibração (Aaron et al, 2015). A Figura 4a apresenta a *trimline* (linha de referência) adotada para a calibração e a Figura 4b apresenta o melhor ajuste dos resultados com o modelo de Voellmy (região azul escuro), indicando um coeficiente de atrito de 0,35.



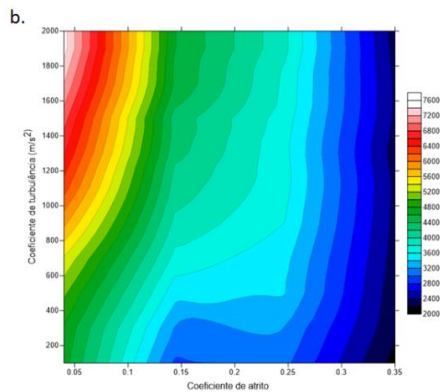


Figura 4. Calibração preliminar dos parâmetros: (a) *Trimline* adotada; (b) Níveis de ajuste dos valores de coeficiente de atrito.

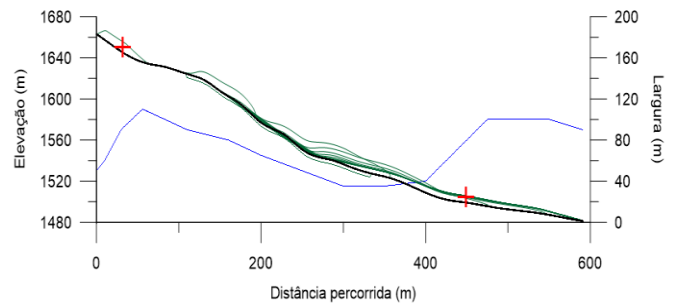
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados da Modelagem 2D

A modelagem 2D do fluxo de detritos com o programa DAN-W foi realizada considerando os dados de perfil e geometria, em função da topografia descrita na caracterização do evento.

Foi utilizada a reologia de atrito para simular o movimento rotacional e a reologia de Voellmy na zona de transporte e deposição, com coeficiente de atrito de 0,2 e fator de turbulência de  $100 \text{ m/s}^2$ . A erosão no canal foi modelada apenas para a zona de transporte do movimento. Assim, na zona de iniciação e deposição, adota-se um valor nulo de erosão. Todavia, ocorre que o canal sofre erosão na zona de deposição, aumentando o volume final do evento. Neste caso foi definida uma profundidade de erosão máxima de 5,0m na zona de transporte, correspondendo à camada de solo argilo-siltoso.

A Figura 5 apresenta um resumo das principais características do evento modelado representadas pelo perfil topográfico, superfície superior do evento, perfil de erosão, largura do canal e centros de gravidade inicial e final do fluxo de detritos.



Legenda: Linha preta: perfil topográfico; Linha verde: superfície superior do movimento; Linha laranja: perfil de erosão definida em cada local; Linha azul: largura do canal; Cruzes vermelhas: centros de gravidade inicial e final do material.

Figura 5. Principais características do fluxo - DAN-W.

A modelagem no DAN-W indicou uma distância percorrida pelo fluxo de 590m e extensão da área de deposição de 335m. Partiu-se de um volume inicial de  $40.000 \text{ m}^3$ , que erodiu o canal e resultou em um volume final de  $100.800 \text{ m}^3$  e uma área de deposição de  $21.500 \text{ m}^2$ . Foram estabelecidos pontos de controle a diferentes distâncias da zona de iniciação do movimento: 100, 200, 300, 400, 500 e 550m, nos quais foram obtidas as velocidades de 21, 18, 17, 14, 8 e 4m/s, respectivamente.

### 5.2 Resultados da Modelagem 3D

Para a modelagem do fluxo de *Llano de la Piedra* foram utilizados três materiais distintos, cada um constituindo a zona de iniciação, zona de transporte e zona de deposição. O material na zona de transporte foi definido com uma profundidade máxima de erosão de 5,0m, pois trata-se de um material argilo-siltoso.

Uma vez realizada a calibração preliminar, foram verificados os parâmetros escolhidos. A primeira aproximação não resultou satisfatória. Desta forma, foram processadas várias simulações, variando-se o coeficiente de atrito até se obter uma melhor aproximação da distância percorrida pelo fluxo de detritos, atingida com coeficiente de atrito igual a 0,2.

Entretanto, nota-se na Figura 6, que esta calibração mostra algumas diferenças na zona de transporte e deposição, as quais podem ser explicadas por limitações dos dados de topografia, com menor precisão que a esperada.

A calibração do coeficiente de turbulência foi realizada baseada em valores estimados de relatórios do evento e em calibrações realizadas para eventos similares, pois não foram tomadas medidas para estimar as velocidades do evento. O coeficiente de turbulência foi adotado igual a  $100 \text{ m/s}^2$ . Os resultados da distribuição espacial de velocidades calculadas pelo DAN3D são mostrados na Figura 7.

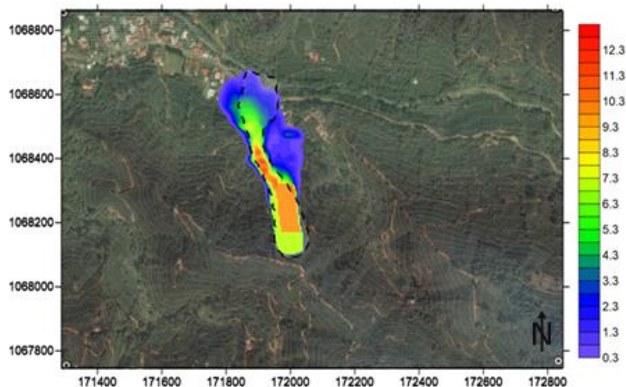


Figura 6. Resultados da calibração final da simulação de distância percorrida.

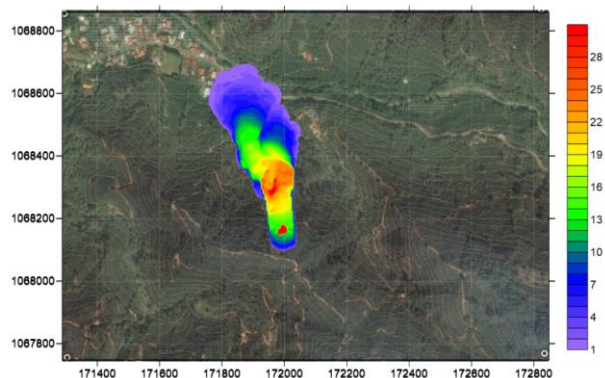


Figura 7. Distribuição espacial de velocidades estimadas pelo programa DAN3D.

Valores de velocidades em pontos específicos ao longo da trajetória são importantes para projetos de estruturas de mitigação e convivência. Assim, foram estimadas velocidades em pontos de controle a 100, 200, 300, 400, 500 e 550m de distância da zona de iniciação, resultando em velocidades de 16, 25, 19, 11, 6 e 3m/s, respectivamente.

Também foram calculadas com o DAN3D as alturas máximas do fluxo e as profundidades máximas de deposição após o evento (Figura 8).

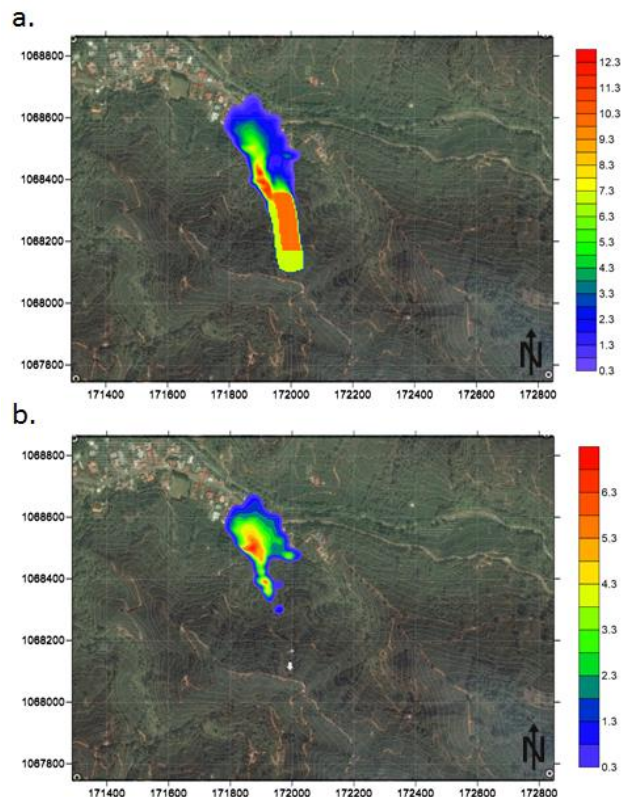


Figura 8. Distribuição espacial de: (a) Altura máxima do fluxo; (b) Profundidade máxima de deposição.

A altura máxima do fluxo e a profundidade máxima de deposição também foram obtidas para pontos de controle ao longo do canal percorrido. Os valores de altura máxima do fluxo e profundidade máxima de deposição foram estimados a distâncias de 100, 200, 300, 400, 500 e 600m da zona de iniciação, obtendo valores de 7,0, 10, 10,5, 6,0, 4,0 e 1,3m, respectivamente para a altura máxima do fluxo e 0,0, 0,0, 3,7, 4,6, 2,7 e 1,2m, respectivamente para altura máxima de deposição.

O movimento simulado com o DAN3D começou com um volume de material de  $40.000 \text{ m}^3$ , resultando em um volume final de  $100.000 \text{ m}^3$  e área de deposição de  $27.000 \text{ m}^2$ . A distância percorrida calculada foi de 575m e a extensão da área de deposição de 338m.

### 5.3 Discussão

A Tabela 1 apresenta uma comparação dos principais parâmetros obtidos das simulações realizadas com o DAN-W e o DAN3D. Os valores calculados com os programas são comparados entre si para verificação de

desempenho dos programas 2D e 3D e com os valores observados após o evento.

Tabela 1. Comparação de resultados numéricos do DAN-W e DAN3D e valores reais observados no evento.

| Parâmetro                           | Valores reais e calculados |        |       | Diferenças Percentuais |             |             |
|-------------------------------------|----------------------------|--------|-------|------------------------|-------------|-------------|
|                                     | Real                       | DAN-W  | DAN3D | DAN-W Real             | DAN 3D Real | DAN-W DAN3D |
| Distância percorrida (m)            | 580                        | 590    | 575   | 2                      | 1           | 3           |
| Extensão da área de deposição (m)   | 300                        | 335    | 338   | 12                     | 13          | 1           |
| Volume final (m <sup>3</sup> )      | 100000                     | 100800 | 97500 | 1                      | 3           | 3           |
| Área de deposição (m <sup>2</sup> ) | 25000                      | 21500  | 26000 | 14                     | 4           | 17          |

Os valores de distância percorrida obtidos das análises numéricas resultaram satisfatórios, com diferença percentual entre 1 e 2% em comparação com o valor observado. A extensão da área de deposição foi calculada pelas simulações com diferenças percentuais entre 12 e 13%. Para a extensão da área de deposição, o DAN3D superestimou a distância em 38m e o DAN-W em 35m e, portanto, os valores se situam a favor da segurança no caso de projetos de obras de convivência.

Os valores numéricos de volume final mostraram diferenças em relação ao valor observado que variam entre 1 e 3% somente, sendo esta diferença desprezível para fins de projeto de estruturas de proteção de fluxos de detritos ou para análises de risco.

Valores da área de deposição obtidos com as modelagens apresentaram diferenças entre 4 e 14%. Estes resultados demonstram que o DAN3D, por ser um programa que utiliza um modelo de elevação digital (MED), consegue obter melhores aproximações da distribuição final do material em comparação com o DAN-W, que utiliza informação limitada de topografia, resultando em uma estimativa mais grosseira da área de deposição. Entretanto, devido à magnitude de evento, considera-se que

ambas as aproximações são razoáveis para um estudo de análise de risco.

De forma geral as diferenças percentuais entre os resultados das simulações são consistentes entre si, ressaltando que foram adotados os mesmos materiais e propriedades para as modelagens 2D e 3D.

Os valores de velocidade calculados pelas modelagens 2D e 3D são apresentados na Figura 9. Observa-se que os resultados das simulações são consistentes. No trecho inicial a maior variação de valores deve ser causada pelo tipo de abordagem de cada programa para construir a zona de iniciação. No caso do DAN-W insere-se a geometria de um sólido em 2D e no DAN3D insere-se a topografia real do material de origem que foi deslocado.

A Tabela 2 apresenta as análises comparativas das velocidades instantâneas em cada ponto de controle. As diferenças entre os valores calculados pelas modelagens variam de 11 a 33%, com maior dispersão no trecho final da trajetória de fluxo, a 500 e 550m da zona de iniciação do movimento.

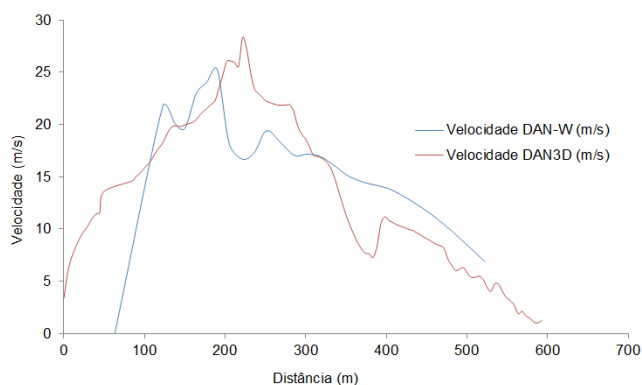


Figura 9. Comparação das velocidades estimadas e calculadas em função da distância percorrida.

Tabela 2. Comparação de velocidades instantâneas numéricas.

| Distância da zona de iniciação (m) | Velocidade máxima instantânea (m/s) |        | Diferenças percentuais DAN-W e DAN3D |
|------------------------------------|-------------------------------------|--------|--------------------------------------|
|                                    | DAN-W                               | DAN-3D |                                      |
| 100                                | 21                                  | 16     | 31                                   |
| 200                                | 18                                  | 25     | 28                                   |
| 300                                | 17                                  | 19     | 11                                   |
| 400                                | 14                                  | 11     | 27                                   |
| 500                                | 8                                   | 6      | 33                                   |

Em relação aos valores calculados pelo DAN-W e DAN3D de altura máxima do fluxo, Valverde (2016) reporta diferenças que variam de 3 a 131%. Os resultados indicam a maior dispersão no último ponto de controle, trecho final da trajetória de fluxo, onde o DAN-W fornece 3,0m de altura e o DAN3D indica 1,3m. As diferenças entre os valores calculados de profundidade de deposição variaram de 0 a 150% e, novamente, com a maior dispersão no trecho final da viagem do fluxo de detritos.

Em geral as aproximações do DAN-W fornecem maiores valores que o DAN3D, porém considera-se que os valores do DAN3D são mais realistas, pois baseiam-se em um MED, enquanto as análises do DAN-W são baseadas no perfil do local que não representa a dispersão real do material mobilizado no terreno. Isto também pode indicar maiores cuidados com as modelagens do DAN-W, pois seus resultados podem subestimar valores de altura de fluxo e profundidade de deposição.

## 6 CONCLUSÕES

O fluxo de detritos de *Llano de la Piedra* foi analisado por meio de simulações numéricas 2D e 3D e as principais conclusões obtidas são destacadas:

1. As modelagens numéricas confirmaram que os modelos de atrito e de Voellmy são apropriados para simulação do evento;
2. Os programas DAN-W e DAN3D mostraram resultados consistentes, indicando que podem ser usados para a simulação de fluxos de detritos;
3. DAN3D fornece melhores aproximações com os eventos reais do que o DAN-W, por ser um programa 3D com distribuição espacial dos resultados;
4. O DAN-W mostrou ser um programa de uso mais amigável, com maior facilidade de inserção dos dados de entrada, e menor tempo de computação, quando comparado com o DAN3D;
5. O DAN-W forneceu menores diferenças percentuais com os dados do evento

observados no campo, ao se comparar com os resultados do programa DAN3D;

6. A maior diferença entre as modelagens com o DAN-W e o DAN3D corresponde à área de deposição.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi financiada pela CAPES. Os autores agradecem ao prof. Oldrich Hungr pela disponibilização dos programas DAN-W e DAN3D e a sua equipe na UBC, em especial aos doutores Jordan Aaron e Scott McDougall pelo auxílio nas análises dinâmicas realizadas no Canadá pela primeira autora.

## REFERÊNCIAS

- Aaron, J.; Hungr, O. (2016) Dynamic simulation of the motion of partially-coherent landslides. *Engineering Geology*, v. 205, p. 1-11.
- Aaron, J.; Hungr, O.; McDougall, S. (2015) Development of a systematic approach to calibrate equivalent fluid runout models. *In press*.
- Ayotte, D.; Hungr, O. (2000) Calibration of a runout prediction model for debris-flows and avalanches, *Proc. Second Int. Conf. on Debris Flow Hazards Mitigation*, Taipei, Balkema, p. 505-514.
- Bermudez, O. (1997) *Análisis del deslizamiento del Llano de la Piedra*, Tesis de PreGrado. Universidad Autonoma de Centroamerica. San José.
- CENIGA (1998) Topografia de Costa Rica, em escala 1:25.000. Centro Nacional de Información Geoambiental, San José, Costa Rica.
- Doherty, J. (2010) Model-Independent Parameter Estimation, *Watermark Numerical Computing*.
- Hungr, O. (1995) A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches, *Canadian Geotechnical Journal*, n.32, p. 610-623.
- Hungr, O. (2003) Flow slides and flows in granular soils. *Int. Workshop on Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earth Fills*.
- Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. (2014) The Varnes classification of landslide types, an update, *Landslides*, n.11, p. 167-194.
- Hungr, O.; McDougall, S. (2009) Two numerical models for landslide dynamic analysis, *Computers & Geosciences*, n.35, pp. 978-992.
- Hungr, O.; Sun, H.W.; Ho, K.K.S. (1998) Mobility of selected landslides in Hong Kong - Pilot back-analysis using a numerical model, *Report Geotech. Engineering Office, Hong Kong SAR Government*.

- Liu, M.B.; Liu, G.R. (2010) Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments, Archives of computational methods in engineering, v. 17, n.1, p. 25-76.
- McDougall, S. (2006) A new continuum dynamic model for the analysis of extremely rapid landslide motion across complex 3D terrain, PhD thesis, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- McKinnon, M.; Hungr, O.; McDougall, S. (2008) Dynamic analyses of Canadian landslides, Proc. 4th Canadian Conference on Geohazards, Québec.
- Nunes, A.L.L.S.; Sayão, A.S.F.J. (2014) Debris Flows e Técnicas de Mitigação e Convivência, 14º Cong. Nacional de Geotecnia, Covilhã, SPG, Portugal, p. 83-123.
- Pelizoni, A.B. (2014) *Análise de fluxos de detritos na região serrana fluminense*, Dissertação MSc, COPPE-UFRJ, 141 p.
- Stiny, J. (1910) Die Muren. Verlag der Wagner'schen. Universitäts-buchhandlung, Innsbruck.
- Valvede, A.M.S. (2016) *Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais*, Dissertação MSc, PUC-Rio, 151 p.
- Valverde, A.M.S., Sayão, A.S.F.J., A.L.L.S. (2016) Análise Dinâmica do Fluxo de Detritos em Lajas, Costa Rica, 15 CNG – Congresso Nacional de Geotecnia, SPG, Porto, Portugal, 12p.
- Xavier Silva, J. (2015) *Análise Numérica 3D do Fluxo de Detritos do Córrego D'Antas*, Dissertação MSc, COPPE-UFRJ, 151 p.