



Modelo de deslizamientos de tierra usando OpenFOAM aplicado a la zona de Pamplona, Colombia.

Landslide model using OpenFOAM applied to the area of Pamplona, Colombia.

Edwin Acevedo ^a; Francisco Cabrera ^a; Juan Carlos Serrano Rico ^b

^a Universidad de Pamplona, Grupo de investigación PANGEA, Colombia

^b Universidad de Pamplona, Programa Ingeniería Mecánica, GIMUP, Colombia

Correspondencia: edwin.acevedo@unipamplona.edu.co

Recibido: Junio 6, 2022 Aceptado: Octubre 1, 2022 Publicado: Octubre 26, 2022

Resumen

Eventos catastróficos tienen diferentes orígenes, algunos naturales y otros debido a fallas de instalaciones o equipos creados por el ser humano, entre los eventos catastróficos naturales están los deslizamientos de tierra. Es ampliamente conocido que los deslizamientos de tierra y los flujos de escombros son provocados por movimientos geológicos o por lluvias intensas. Debido a su configuración geológica, geomorfológica y climática, algunas regiones son más propensas a la ocurrencia de este tipo de fenómenos. En este campo, la investigación se ha concentrado en el desarrollo de tecnología para la predicción de los deslizamientos. En este trabajo se simula un deslizamiento de tierra superficial producto de lluvias en el cual el geo material involucrado en el deslizamiento puede modelarse como un fluido, se toma mediciones en terreno usando un mapa digital de elevación DEM y se obtiene los parámetros característicos del suelo mediante técnicas de prospección sísmica, finalmente se implementa un modelo reológico que se adapta a las condiciones del suelo y se usa el software OpenFOAM para modelar un deslizamiento de tierra en la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander, donde se muestra la extensión de propagación de un posible deslizamiento de tierra sobre la Universidad de Pamplona.

Palabras clave: Deslizamiento; Modelo; Flujo.

Abstract

Catastrophic events have different origins, some of them happened in natural way and some others due to failures in facility or equipment created by human beings. Among the natural catastrophic events are landslides. It is widely known that landslides and debris flows are triggered by geological movements or heavy rainfall. Due to their geological, geomorphological and climatic configuration, some regions are more prone to the happening of this type of phenomena. In this study field, research has focused on the development of landslide prediction technology. In this work, a superficial landslide product of rains is simulated in which the geomaterial involved in the landslide can be modeled as a fluid, measurements are taken on the ground spot using a digital DEM elevation map and the characteristic parameters of the soil are obtained by means of seismic prospecting techniques, finally a rheological model is implemented which adapts to soil conditions and the OpenFOAM software is used to model a landslide in the km 1 zone via Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander, where the extension of propagation of a possible landslide over the University of Pamplona is shown.

Keywords: Landslide; Model; Flux.

1. Introducción

Los deslizamientos de tierra a menudo ocasionan daños considerables en infraestructuras y pérdida de vidas humanas, es conocido que sobre todo en temporada de lluvias se presentan una gran cantidad de deslizamientos. El modelado de deslizamientos y avalanchas representa una herramienta para la comprensión de este tipo de fenómenos, además

permite explicar eventos pasados y gestionar riesgos futuros siendo fundamentales para el mapeo de zonas de peligro.

De acuerdo a [1], los movimientos en masa son definidos como desplazamientos descendentes de materiales que conforman un talud o ladera, que a su vez se encuentran compuestos de roca, suelo, detritos, rellenos artificiales o de la combinación de estos materiales, y que ocurren por efecto de la gravedad. La clasificación de estos eventos actualmente se rige por la naturaleza del proceso, escala, velocidad, el tipo de material involucrado, tamaño de las partículas, el mecanismo

de falla, entre otros cómo se menciona en [2]. En este trabajo se modela deslizamientos de masa superficiales tipo flujo, donde el geo material involucrado en el deslizamiento se puede considerar como un fluido, esto ocurre en los movimientos de ladera asociados a fuertes lluvias.

El modelo de flujo consta por un lado de las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía, que corresponde a las ecuaciones básicas de conservación y su reformulación en forma integral según [3], por otro lado, las ecuaciones constitutivas que completan las ecuaciones gobernantes teniendo en cuenta las propiedades reológicas del material en movimiento cómo se menciona en [4].

Se han propuesto métodos numéricos para solucionar las ecuaciones que describen el comportamiento de materiales sometidos a flujo, por ejemplo, en [5] se empleó la ecuación constitutiva elastoplástica para suelo arenoso no saturado en el modelo de flujo, en [6] se resuelve las ecuaciones de Navier Stokes y como cierre se usa el modelo constitutivo tipo Bingham para simular suelos arcillosos, en [7] se describe el comportamiento de deslizamientos tipo flujo y avalanchas mediante un esquema basado en [3], para la aplicación a flujos superficiales en terreno natural que es el enfoque de este trabajo.

Desde la primera aplicación del esquema de flujos superficiales que se atribuye a [3] el modelo mecánico ha sido continuamente mejorado y extendido a, superficies bidimensionales simples [8], superficies complejas poco profundas [9] o flujo curvo y retorcido [10]. Finalmente, los modelos respectivos se han adaptado al terreno natural, es decir, arbitrario, pero ligeramente curvado, lo que hace posible la simulación de casos reales de deslizamientos y avalanchas.

Existen varios métodos numéricos para resolver las respectivas ecuaciones gobernantes, básicamente, la mayoría de los métodos se pueden clasificar como métodos de diferencias finitas como los usados por ejemplo [11], métodos de elementos finitos por ejemplo [12], métodos de volumen finito [13] o como métodos de partículas lagrangianas [14]. El método de áreas finitas proporciona todos los operadores necesarios para esta clase de modelos. Esto permite una implementación relativamente sencilla.

Recientemente [15], propusieron un modelo de flujo granular superficial, como un problema matemático bidimensional integrando las respectivas ecuaciones de conservación. Esto da como resultado ecuaciones diferenciales parciales, expresadas en términos de gradientes a lo largo de la superficie sobre la cual viaja el flujo, expresado en términos de ecuaciones diferenciales parciales de superficie [16,17] presentaron una implementación de código abierto basada en el conjunto de herramientas CFD OpenFOAM®. El modelo mecánico subyacente es muy similar al modelo clásico de [3] y sus derivaciones.

El solucionador presentado en [15] implementa un modelo monofásico incompresible que incluye varios cierres de arrastre y fricción basal intercambiables, lo cual permite describir algunos tipos de flujo, por ejemplo, flujos granulares de acuerdo a [18], flujos de nieve, avalanchas según [19], también flujos de lodo y derrubios de acuerdo a [20], estos

modelos constitutivos pueden ser modificados o incluso es posible implementar nuevos modelos constitutivos para la descripción de diferentes flujos de acuerdo a las características reológicas.

La zona kilómetro 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander presenta una configuración geológica montañosa y los fuertes aguaceros han ocasionado constantemente deslizamientos en la vía que conduce de Pamplona a Bucaramanga por lo cual esta zona se considera ideal para la simulación de deslizamientos. En el terreno de estudio se identifica un área de liberación de acuerdo a la morfología de la zona y se mide parámetros característicos del suelo que permiten su descripción reológica para aplicar el modelo constitutivo de Voellmy [20], adicionalmente se toma datos de batimetría que contienen la topografía del terreno, teniendo en cuenta así parámetros in situ para una aproximación a la posible ocurrencia de deslizamientos en esta zona.

2. Modelo matemático

El solucionador empleando en OpenFOAM se llama *faSavageHutterFoam*, el cual se basa en un modelo de flujo integrado en profundidad similar al modelo de [3], la teoría de este solucionador es descrita por [15] y la aplicación a terreno natural ha sido desarrollada e implementada por [7]. El modelo describe un flujo granular de espesor h , velocidad promedio en profundidad $\bar{\mathbf{u}}$ y densidad ρ en un terreno complejo,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h\bar{\mathbf{u}}) = S_e - S_d, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (h\bar{\mathbf{u}})}{\partial t} + \nabla \cdot (h\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{1}{\rho}\boldsymbol{\tau}_b + h\mathbf{g}_s - \frac{1}{2\rho}\nabla s(hp_b), \quad (2)$$

$$\nabla_n \cdot (h\bar{\mathbf{u}}\bar{\mathbf{u}}) = h\mathbf{g}_n - \frac{1}{2}\rho\nabla_n(hp_b) - \frac{1}{\rho}\mathbf{n}_b p_b. \quad (3)$$

La Ec.(1) representa la conservación de la masa, la Ec.(2) la conservación del momentum tangencial superficial y la Ec.(3) el momentum normal superficial, \mathbf{g}_s es la aceleración gravitatoria tangencial superficial y \mathbf{g}_n la aceleración gravitacional normal superficial, \mathbf{n}_b es entonces el vector normal superficial. La tasa de arrastre volumétrico S_e , la tasa de deposición S_d y la fricción basal $\boldsymbol{\tau}_b$ se expresan como funciones locales de la velocidad integrada en profundidad $\bar{\mathbf{u}}$ y la presión basal p_b como se muestra en [7] y [15] y teniendo en cuenta el modelo constitutivo de acuerdo a las propiedades del flujo a modelar.

1.1 Modelo reológico

Las ecuaciones Ec.(1), Ec.(2) y Ec.(3) se complementan con la fricción basal $\boldsymbol{\tau}_b$ y el arrastre S_e , siguiendo el modelo

constitutivo de Voellmy [20], para la fricción basal se tiene:

$$|\tau_b| = \mu p + \frac{\rho g}{\xi} |\bar{u}|^2. \quad (4)$$

Donde $\mu = \tan(\phi)$ representa el coeficiente de fricción interna del suelo, para el caso específico se ha encontrado que el suelo de la zona tiene un ángulo de fricción $\phi = 18^\circ$, por lo tanto $\mu = 0.32$ y ξ es el coeficiente de turbulencia de Voellmy.

1.2 Modelo de arrastre

Este modelo de arrastre ha sido aplicado a flujos de derrubios y lodo como se muestra en [21], según este enfoque el arrastre se calcula a partir de consideraciones de estabilidad de la capa basal. La tasa de arrastre volumétrico S_e , se calcula como:

$$|S_e| = \frac{|\tau_b| - c - \mu P_b}{\rho(|g_n| - \mu|g_s|)}. \quad (5)$$

Donde c representa la cohesión, para el terreno en estudio este parámetro tiene un valor $c = 150kPa$.

3. Descripción del terreno

La zona kilómetro 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander presenta una geomorfología propensa a deslizamientos de tierra por sus pendientes y la composición del suelo. En la parte superior de la ladera se evidencia una serie de grietas en el suelo producto de la saturación del mismo efecto de acumulación de agua cómo se muestra en el recuadro de la Fig. 1.



Figura 1. Ortofotografía de la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander, coordenadas 1157934.6,1308667.6 SRC: EPSG 4326
Fuente: Autores.

El procesamiento previo de los datos se realiza principalmente a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG), para el caso específico de usa la herramienta de código abierto QGIS. Los datos GIS se traducen a diccionarios OpenFOAM utilizando scripts de Python cómo se menciona en [7], de este modo es posible importar la topografía del terreno a partir de archivos ráster, el mapa digital de elevación DEM de la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander se muestra en la Fig. 2.

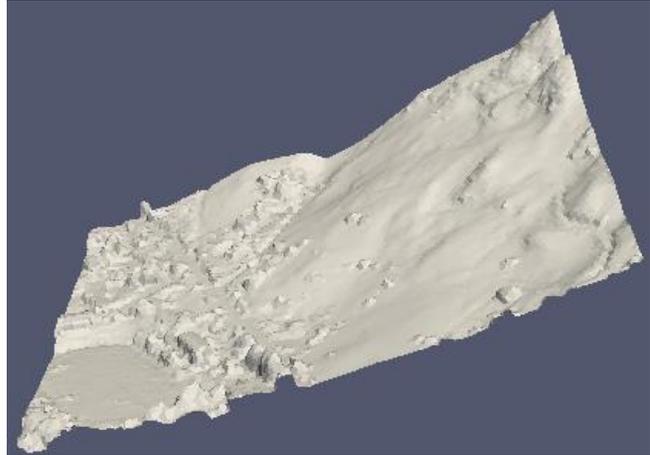


Figura 2. Mapa digital de elevación (DEM) de la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander
Fuente: Autores.

El DEM ha sido creado mediante la utilidad *gridToSTL* en el software OpenFOAM a partir de datos ráster tomados del terreno, este archivo conforma la geometría del problema, claramente se observa la topografía 3D de la zona en estudio.

4. Construcción del modelo

A partir del archivo DEM se genera una malla que cubre el volumen por encima y alrededor del terreno de interés, pero solo se utiliza la malla límite inferior que corresponde al terreno de la zona. Se usa la utilidad *pMesh* que aplica un modo dominado por polígonos con refinamientos cerca de las superficies relevantes como se muestra en la Fig. 3.

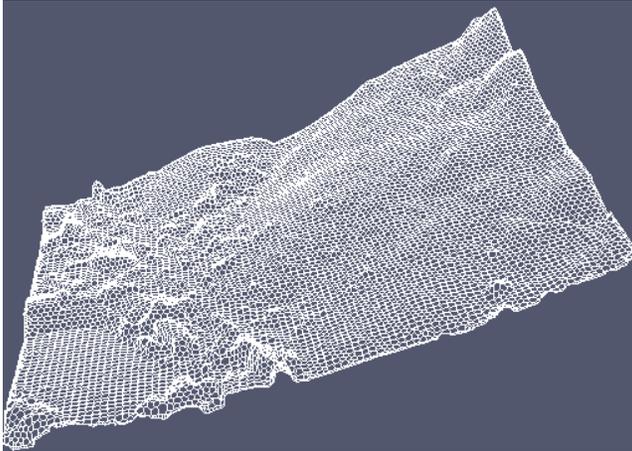


Figura 3. Mallado generado con *pMesh* sobre la geometría de la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander.

Fuente: Autores.

La utilidad *pMesh* es capaz de crear mallas de superficie suave de alta calidad, lo cual es necesario para la estabilidad del método de área finita. Este es un resultado significativo, considerando la topografía irregular del terreno montañoso y las estructuras como edificios y vías. Posteriormente se define una zona de deslizamiento en la parte superior de la ladera que se denomina área de liberación, una capa delgada de terreno que inicialmente entra en movimiento sobre la montaña cómo se muestra en la Fig. 4.

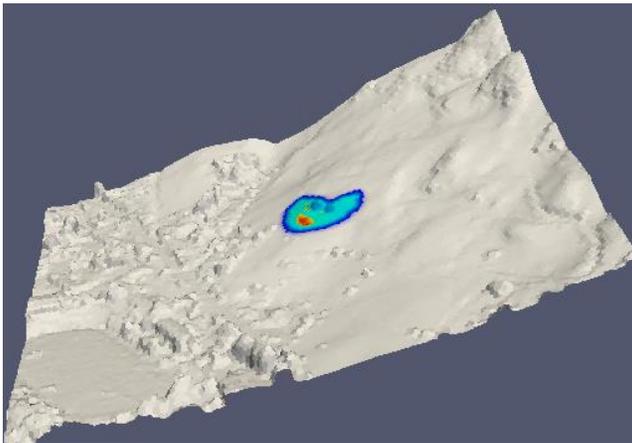


Figura 4. Área de liberación sobre la geometría de la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander

Fuente: Autores.

El deslizamiento de tierra se inicia por una liberación repentina de toda la capa de suelo en una región inestable. La corriente de turbidez es iniciada por un flujo de entrada, donde se establece una condición límite de Dirichlet. El resto de los límites se especifican como condiciones de contorno de Neumann., se pueden encontrar más detalles sobre la configuración de simulaciones en [15].

5. Resultados

Los siguientes resultados muestran la extensión de propagación de un posible deslizamiento de tierra en la zona kilómetro 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander, teniendo en cuenta datos de topografía del terreno y usando la caracterización de suelos de dicha zona para establecer parámetros del modelo. De acuerdo al área de liberación establecida la Fig. 4 se presenta el flujo temporal del descenso de geo material fluido a lo largo de la ladera

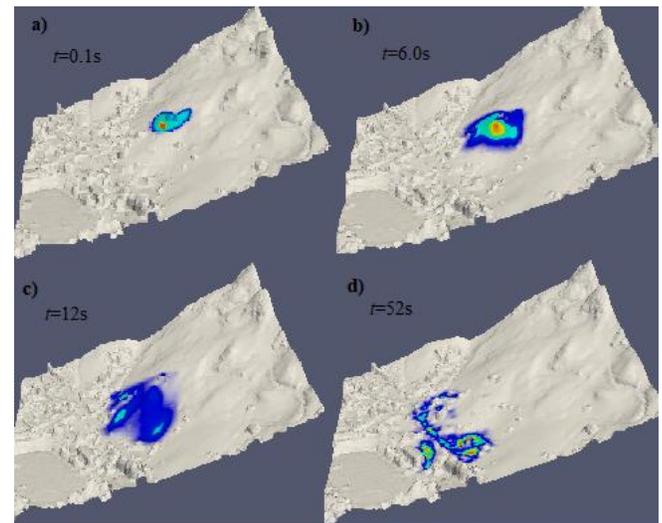


Figura 5. Serie temporal de Propagación y extensión de un posible deslizamiento en la zona, simulado con *faSavageHutterFoam* y visualizada en ParaView.

La Fig. 5 muestra la línea de tiempo de la simulación del deslizamiento realizado con OpenFOAM mediante la herramienta *faSavageHutterFoam*. La capa de terreno con un espesor de aproximadamente 1m se libera en $t = 0s$ y viaja cuesta abajo con una velocidad de hasta 4 m/s. De acuerdo a la simulación, el deslizamiento ocurre en 52 segundos y la zona de deposición se muestra en la Fig. 6, el espesor de material alcanza los 2.4 metros, cubre la carretera y una parte entra al campus de la Universidad de Pamplona como se muestra en la Fig. 7.

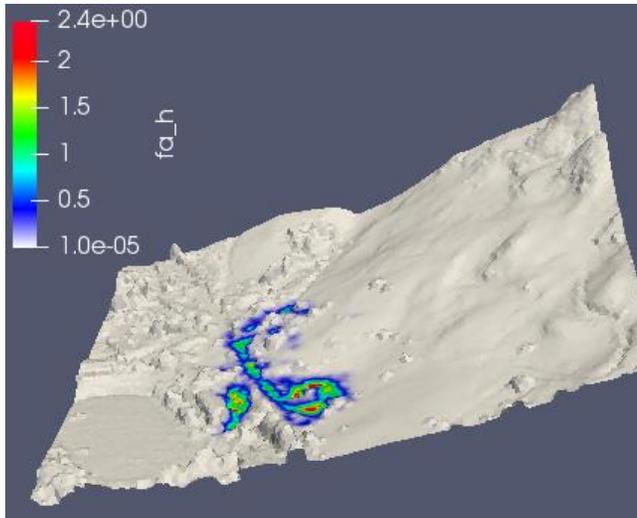


Figura 6. Extensión de propagación de un posible deslizamiento en la zona. La escala de colores representa el espesor del flujo fa_h en metros.

Fuente: Autores.

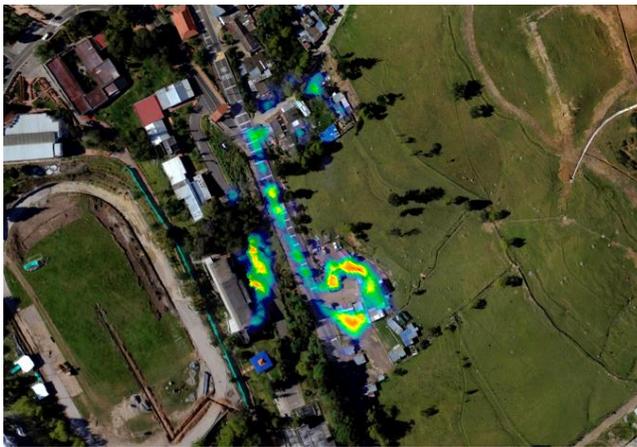


Figura 7. Deposición final del deslizamiento, muestra las viviendas e infraestructura afectadas.

Fuente: Autores.

La simulación se ejecutó en un procesador Intel(R) Core i5-7250U 16g RAM, gráficos NVIVIA GeForce 950MX.

6. Conclusiones

Los deslizamientos de tierra son comunes y variados, su comportamiento depende de muchos factores, principalmente de la variedad de materiales en flujo. El esquema presentado incluye los solucionadores y herramientas para configurar diversos tipos de flujos lo cual permite aplicar este esquema a varios tipos de deslizamientos y avalanchas mediante software de código abierto.

Se implementa un modelo de arrastre teniendo en cuenta los parámetros c y μ del suelo que permite describir el arrastre del geo material en flujo y se presenta la topografía

del terreno en un mapa de elevación digital, de acuerdo a la simulación, un deslizamiento de tierra podría presentarse en la zona km 1 vía Bucaramanga, Pamplona Norte de Santander y tener consecuencias significativas dependiendo del área de liberación inicial, cómo se muestra en la Fig. 6, el espesor de flujo alcanza alturas de 2.4 metros y la extensión incluye el campus de la Universidad de Pamplona y la vía nacional que comunica de Pamplona a Bucaramanga.

La simulación describe un flujo superficial lo cual es una buena aproximación a muchos deslizamientos ocasionados por lluvia y avalanchas sin embargo otros tipos de deslizamientos requieren una descripción en profundidad para obtener resultados satisfactorios.

El software OpenFOAM es una herramienta poderosa para la simulación de flujos, sin embargo, la generación de mallas y soluciones sobre superficies complejas tiene costo computacional elevado.

Referencias

- [1] Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. Special report, 176, (1978) 11-33.
- [2] Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11 (2) (2013) 167-194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>
- [3] Savage S.B., Hutter K., The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. Journal of Fluid Mechanics, (1989) 177-215. <https://doi.org/10.1017/s0022112089000340>
- [4] De Blasio F. V., Introduction to the Physics of Landslides, Dordrecht: Springer Netherlands (2011) 88-107
- [5] Matsumaru T., Uzuoka R., Three-phase coupled analysis of unsaturated embankment subjected to rainfall infiltration and seismic motion, Unsaturated Soils: Research & Applications. CRC Press, (2014) 597-603. <https://doi.org/10.1201/b17034-83>
- [6] Moriguchi S., Yashima A., Sawada K., Uzuoka R., Ito M., Numerical simulation of flow failure of geomaterials based on fluid dynamics, Soils and Foundations, 45 (02) (2005) 155-165. https://doi.org/10.3208/sandf.45.2_155
- [7] Rauter M., Kofler A., Fellin W., faSavageHutterFOAM 1.0: depth-integrated simulation of dense snow avalanches on natural terrain with OpenFOAM. Geoscientific Model Development, 11(7), (2018) 2923-2939. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2923-2018>
- [8] Greve, R., Koch, T., Hutter, K.: Unconfined Flow of Granular Avalanches along a Partly Curved Surface. I. Theory, P. Roy. Soc. Lond. A Mat., 445, (1994) 399-413, <https://doi.org/10.1098/rspa.1994.0068>
- [9] JGray J. M. N. T., Tai Y.C., S. Noelle, Shock waves, dead zones and particle-free regions in rapid granular free-surface flows, Journal of Fluid Mechanics, 491 (2003) 161-181 <https://doi.org/10.1017/s0022112003005317>
- [10] Pudasaini S.P, Eckart W, Hutter K., Gravity-Driven rapid shear flows of dry granular masses in helically curved and twisted channels, Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 13 (07) (2003) 1019-1052. <https://doi.org/10.1142/s0218202503002805>
- [11] Wang, Y., Hutter, K., Pudasaini, S. P., The Savage-Hutter theory: A system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud, ZAMM-Z, 84 (8) (2004) 507-527. <https://doi.org/10.1002/zamm.200310123>

-
- [12] Hanert E., Le Roux D.Y., Legat V., Deleersnijder, E., An efficient Eulerian finite element method for the shallow water equations, *Ocean Model.*, 10 (2005) 115–136. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.06.006>
- [13] Christen M., Kowalski J., Bartelt, P., RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 63 (2010) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>
- [14] Sampl P., Granig M., Avalanche Simulation with SamosAT, in: *Proceedings of the International Snow Science Workshop, Davos*, 27 (2009) 519–523.
- [15] Rauter M., Tuković, Ž., A finite area scheme for shallow granular flows on three-dimensional surfaces. *Computers & Fluids*, 166 (2018) 184–199. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2018.02.017>
- [16] Deckelnick K., Dziuk G., and Elliott, C. M., Computation of geometric partial differential equations and mean curvature flow, *Acta Numer.*, 14, (2005) 139–232. <https://doi.org/10.1017/S0962492904000224>
- [17] Tuković Ž., Jasak H., A moving mesh finite volume interface tracking method for surface tension dominated interfacial fluid flow, *Computers & Fluids*, 55 (2012) 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.11.003>
- [18] Pouliquen O., Y. Forterre Y., Friction law for dense granular flows: Application to the motion of a mass down a rough inclined plane, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 453, (2002) 133–151, <https://doi.org/10.1017/s0022112001006796>
- [19] Jop P., Forterre Y., Pouliquen O., A constitutive law for dense granular flows, *Nature*, 441 (7094) (2006). 727–730, <https://doi.org/10.1038/nature04801>
- [20] Voellmy A., Über die Zerstörungskraft von Lawinen., *Schweizerische Bauzeitung* 73 (15).
- [21] Medina V., Hürlimann M., Bateman A., Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula. *Landslides*, 5 (1) (2007) 127–142. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0102-3>