

# Flujos de lodo del volcán Carihuairazo provocados por el terremoto de Ambato, Ecuador, en 1698 y su reconstrucción numérica con perspectivas a futuro

Mudflows from the Carihuairazo volcano caused by the earthquake in Ambato, Ecuador, in 1698 and its numerical reconstruction with future perspectives

Francisco Javier Vasconez<sup>1</sup>  
Roberto Vásconez<sup>2</sup>  
Patricia Ann Mothes<sup>3</sup>

*Recibido el 3 de agosto de 2020; aceptado el 17 de noviembre de 2021*

## Resumen

En 1698, registros históricos narran la ocurrencia de un gran terremoto ( $7.3 M_c$ ) a los pies del volcán Carihuairazo, Ecuador. El terremoto destruyó la antigua ciudad de Ambato y desencadenó enormes flujos de lodo que descendieron por el río Ambato. Los flujos de lodo enterraron las entonces ruinas de la ciudad y a los sobrevivientes del terremoto. El presente manuscrito utiliza información de los registros históricos y datos de campo para reconstruir los flujos de lodo del evento, utilizando simulaciones numéricas con el fin entender el fenómeno y posibles implicaciones futuras. Eventos de esta naturaleza han ocurrido en la historia reciente del Ecuador y representan una amenaza latente para la sociedad.

Palabras clave: *Carihuairazo, terremoto 1698, deslizamiento, flujos de lodo, aluvión, VolcFlow.*

<sup>1</sup> Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, correo electrónico: [fjvasconez@igepn.edu.ec](mailto:fjvasconez@igepn.edu.ec)

<sup>2</sup> Exploraciones Novomining S.A., Ecuador, correo electrónico: [robertovm@hotmail.com](mailto:robertovm@hotmail.com)

<sup>3</sup> Instituto Geofísico, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, correo electrónico: [pmothes@igepn.edu.ec](mailto:pmothes@igepn.edu.ec)

## Abstract

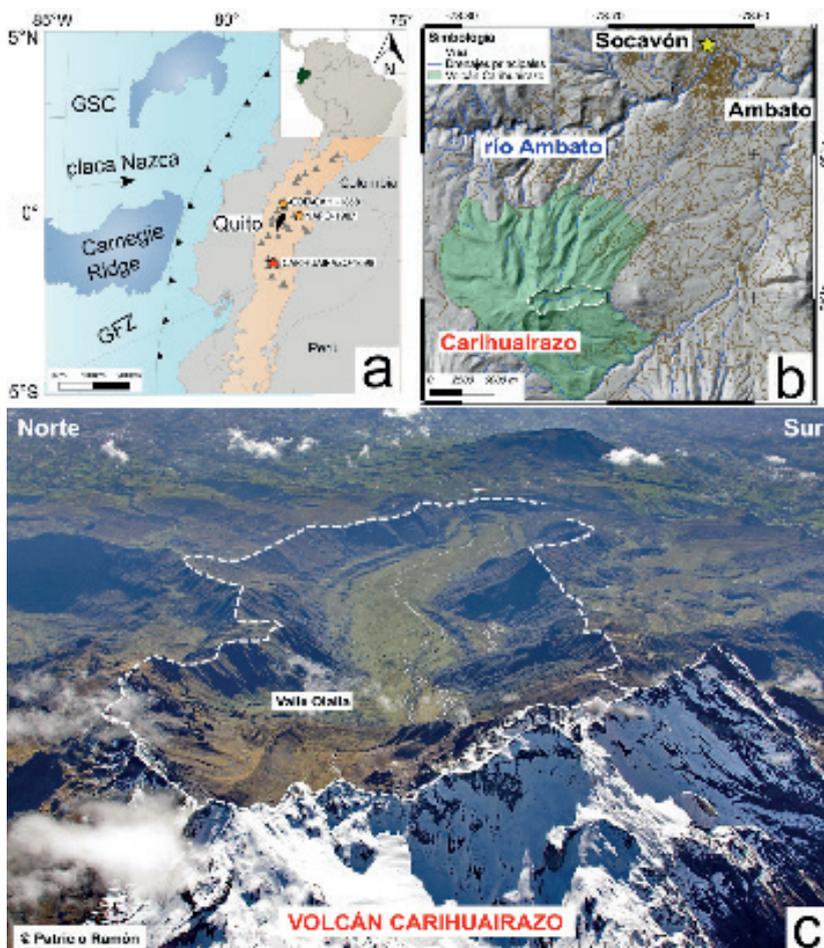
Historical records from 1698 reported a large earthquake 7.3 MIC at the basal plain of Carihuairazo volcano (Ecuador). The earthquake destroyed the old Ambato city and triggered large mudflows which flowed down the Ambato River. The flows buried the earthquake's survivors and what was left of the city. This manuscript uses historical records and field data to reproduce these mudflows by using numerical modelling to better understand this phenomenon and its potential future implications. Events of this nature have occurred in the recent history of Ecuador and are a latent threat to society.

*Key words: Carihuairazo, 1698 earthquake, landslide, mudflow, VolcFlow.*

## Introducción

El Carihuairazo (1.40° S, 78.75° W, 4 940 msnm) es un volcán extinto (Hall *et al.*, 2008) de alrededor de 220 mil años (Samaniego *et al.*, 2012). Está ubicado en la cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos, a 140 km de la capital, Quito (Figura 1a) y, a 23 km al suroccidente de la ciudad de Ambato (Figura 1b). El volcán Carihuairazo, que en idioma kichwa significa "viento macho" o "viento bravo" (Barriga López, 2015), cubre un área aproximada de 174 km<sup>2</sup> y tiene un volumen de 21.5 km<sup>3</sup>. A lo largo de su historia geológica han ocurrido al menos cuatro grandes avalanchas de escombros con volúmenes entre 0.1 y 4 km<sup>3</sup> (Ordóñez *et al.*, 2011). Estas avalanchas ocurrieron hace decenas de miles de años y han moldeado la superficie del volcán con grandes cicatrices en forma de herradura (Figura 1b y Figura 1c).

Por otro lado, fenómenos morfo-climáticos como deslizamientos e inundaciones se han observado ampliamente en las quebradas de este volcán extinto. Algunos de ellos fueron inducidos por grandes terremotos como el ocurrido la madrugada del 20 de junio de 1698 (Barriga López, 2015; Wolf, 1873). Ese día, un gran terremoto de intensidad X en la escala Mercalli y de magnitud 7.3 M<sub>c</sub> ocurrió en las cercanías del volcán Carihuairazo (Beauval *et al.*, 2010; Yepes *et al.*, 2016). El sismo fue tan intenso que destruyó la ciudad de Ambato, dejando a familias enteras enterradas bajo los escombros (Wolf, 1873). Además, dio lugar a grandes deslizamientos en la zona alta nororiental del Carihuairazo. Estos suelos, al estar saturados en agua lluvia, rápidamente se fluidizaron transformándose en enormes flujos de lodo que descendieron por varias quebradas del volcán hasta unirse aguas abajo en el río Ambato (Vásconez *et al.*, 2009; Wolf, 1873). Este al no poder contener la inmensa masa de lodo, la derramó a lo largo de sus orillas sepultando una gran parte de las recientes ruinas de la ciudad (Wolf, 1873). El sector actualmente conocido como El Socavón (Figura 1b), que en ese entonces era la ubicación del primer asentamiento de Ambato fue totalmente arrasado por el flujo, alcanzando un calado de 40 metros (Vásconez *et al.*, 2009). Según Wolf,



**Figura 1.** a) Entorno geodinámico del Ecuador continental: subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana y ubicación del volcán Carihuairazo (estrella roja). Las estrellas naranjas representan el epicentro de otros terremotos que generaron grandes flujos de lodo en el Ecuador. El polígono negro es la ciudad de Quito como referencia. Los volcanes cuaternarios están señalados como triángulos grises y la cordillera de los Andes del Norte en naranja claro. GFZ: zona de fractura Grijalva, GSC: dorsal Galápagos. b) Mapa de ubicación del volcán Carihuairazo (polígono verde) y la ciudad de Ambato. La estrella amarilla corresponde al sector de El Socavón en donde estaba asentada la antigua ciudad de Ambato en 1698. Los principales ríos/drenajes y carreteras están señalados en líneas de color azul y café, respectivamente. c) Vista aérea del volcán Carihuairazo, en primer plano destaca la cicatriz de una avalancha de escombros (línea blanca entrecortada) ocurrida hace varios miles de años (Ordóñez *et al.*, 2011) y al fondo las zonas pobladas y de cultivo.

(1873) murieron cerca de 3 mil personas a causa de este evento, que para ese entonces representaba un porcentaje muy alto de la población total de la ciudad.

Hoy en día, Ambato alberga a más de 380 mil habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2020), concentrados en una superficie menor a 30 km<sup>2</sup> (Figura 1b). La ciudad ha crecido de forma desorganizada y ha olvidado que históricamente ha sido afectada por grandes terremotos, deslizamientos e inundaciones. El presente artículo utiliza potentes herramientas computacionales para reconstruir los grandes deslizamientos que indujeron la formación de los enormes flujos de lodo durante el terremoto de Ambato de 1698, hace más de 300 años. La validación de los modelos está sustentada con datos de campo e información extraída de los registros históricos. La reconstrucción validada de eventos pasados permite definir nuevos escenarios de peligro, con el fin de determinar las zonas que potencialmente pudiesen ser afectadas y sus implicaciones futuras bajo las condiciones actuales de desarrollo urbano. Estos resultados pueden ser utilizados por las autoridades de turno para planificar el crecimiento de la mancha urbana de Ambato y, la ubicación adecuada de infraestructura crítica (escuelas, hospitales, sistema de agua potable, entre otros), considerando la redundancia de estos sistemas.

## Datos y metodología

En esta sección se resumen los datos más relevantes obtenidos del registro histórico y del trabajo de campo llevado a cabo en los años 2006 y 2019. Esta información fue utilizada como datos de entrada, para la reconstrucción numérica del evento ocurrido en 1698 y la identificación de la actual infraestructura crítica expuesta. Además, se hace referencia al modelo matemático utilizado para la reconstrucción del evento.

### **Registro histórico**

El análisis de los registros históricos permitió reconocer la ocurrencia de grandes flujos de lodo inducidos por sismos en el Ecuador continental. Entre ellos destacan los flujos de lodo del Carihuairazo, 1698 (Barriga López, 2015; Kolberg, 1977; Wolf, 1873), Cotacachi, 1868 (Stübel y Reiss, 1987) y Napo, 1987 (Hall, 2000), todos ellos localizados en la región Sierra (Figura 1a). A pesar de ser pocos dentro de los más de 500 años de historia escrita del Ecuador, se puede estimar a groso modo un periodo de retorno de  $145 \pm 25$  años, para estos grandes eventos. Todos ellos han dejado a su paso pérdidas de vidas y destrucción de infraestructura, razones por las cuales constituyen una amenaza latente para las crecientes poblaciones de la región Sierra del Ecuador.

Sobre lo ocurrido el 20 de Junio de 1698, Kolberg (1977) escribe:

Sin duda, durante el terremoto tuvieron lugar muchos derrumbes del monte que con sus materiales llenaron las quebradas escarpadas y que tenían muchas aguas, de modo que, como en el terremoto de Ibarra (1868), ocasionaron numerosas

correntadas de lodo. Algunas de ellas, que irrumpieron por las laderas del lado norte del Carihuairazo, se desbordaron desde Ambato y sepultaron los tristes escombros de la infeliz ciudad con todas las vidas que todavía esperaban encontrar salvación. Seguramente esta tormenta no llegó con la velocidad con que se dice, pues los habitantes que pudieron salir de entre las ruinas de sus casas tuvieron tiempo de buscar salvación en las alturas, cuando ya empezaba a extenderse sobre las calles el río de lodo.

Mientras que Wolf, (1873) describe:

A la una de la mañana de dicho día comenzó a moverse el suelo con tanta vehemencia que ya a la segunda ondulación en Ambato no quedó ninguna casa en pie. Familias enteras quedaron enterradas bajo los escombros de sus casas y se extinguieron completamente. Los que quedaron con vida bajo las ruinas, pidiendo socorro, murieron de otro modo; pues, un cuarto de hora después (15 min) del terremoto se precipitaron avenidas de agua y lodo sobre la población, de suerte que ya nadie pensó en socorrer a otros, y todos huyeron a las alturas. Dichas avenidas tuvieron su origen más de cuatro leguas (~20 km) más arriba en las faldas del Carihuairazo. Se dicen que, de muchos lugares, por las quebradas y los cauces de los ríos bajó un lodo muy hediondo. Los muchos ríos pequeños, cada uno de los cuales hizo bastantes estragos, se reunieron en el de Ambato, y este no pudiendo contener en su cauce la masa inmensa de lodo, la derramó sobre ambas orillas sepultando una gran parte de las recientes ruinas de Ambato. Cuando después se quiso socorrer a los enterrados, ya no sacaron sino cadáveres. En consecuencia, a este acontecimiento Ambato se fundó en un sitio algo más alto y retirado del río, es decir, en el mismo lugar en donde está hoy día.

De los relatos históricos, rescatamos varios datos que serán utilizados en la simulación numérica y validación como:

- a) El terremoto induce deslizamientos, estos se fluidizan y forman flujos de lodo. El tiempo de formación y acumulación de sedimentos es corto, en la escala de pocos minutos.
- b) La zona de formación de los flujos de lodo es 20 km aguas arriba de la antigua ciudad de Ambato, es decir en las pendientes altas del volcán Carihuairazo.
- c) Los deslizamientos ocurren en varias quebradas de forma simultánea, y forman varios flujos de lodo, los cuales se unen aguas abajo en el río Ambato (Figura 2a).
- d) El suelo de páramo es el material sólido principal que constituye los flujos de lodo.
- e) Los flujos de lodo fueron lentos e inundaron la zona del Socavón (Figura 1b) 15 minutos después de ocurrido el terremoto.
- f) Las zonas altas son sitios seguros.

### ***Datos de campo***

Los depósitos de los flujos de lodo del Carihuairazo se encuentran en las quebradas de Chiquicahua, Pataló, Quichibi, Terremoto, Catequilla y Olalla-



Finalmente, los suelos en la zona fuente (parte alta del volcán, Figura 2a) corresponde a andisoles de 1 a 3 m de espesor, de color café oscuro a negro, homogéneos y porosos. La formación de estos suelos comenzó después de la última glaciación a inicios del Holoceno (Schubert y Clapperton, 1990) y bajo este suelo se encuentra una gruesa capa de depósitos glaciales muy compactos e impermeables, los cuales constituyen un plano de deslizamiento.

### **Simulación numérica de flujos de lodo y escombros**

Hoy en día existen varios modelos numéricos para simular flujos gravitacionales. Estos modelos pueden ser estadísticos: LaharZ (Schilling, 1998), determinísticos: VolcFlow (Kelfoun y Druitt, 2005), LaharFlow (Darnell *et al.*, 2013) o estocásticos (Sandri *et al.*, 2018; Tierz *et al.*, 2016). Modelos estadísticos como LaharZ se fundamentan en la relación: alcance y sección transversal inundada. Este modelo utiliza cientos de ejemplos de flujos de lodo y escombros que han ocurrido en el mundo (Iverson, 1998), para formular dos ecuaciones que reproduzcan el comportamiento típico (estadísticamente hablando) de este fenómeno (Schilling, 1998). Por otro lado, los modelos estocásticos (tipo Monte Carlo; Metropolis y Ulam, 1949), simplifican la física de estos flujos con el objetivo de simular miles de escenarios al mismo tiempo. Estos escenarios varían en uno o pocos parámetros de entrada, para posteriormente determinar el área más probable a ser afectada por el fenómeno (Tierz *et al.*, 2016). Finalmente, el método determinístico, el cual utilizaremos en este ensayo, es el código abierto VolcFlow. Este modelo se fundamenta en las ecuaciones de conservación de la masa y el *momentum* (Kelfoun y Druitt, 2005) sobre un modelo digital del terreno (10 m, MDT). Este modelo físico emplea la reología del flujo, es decir, valores de viscosidad, densidad, cohesión, entre otros. y tiempos de alimentación y depositación. VolcFlow ha sido ampliamente utilizado para simular diferentes flujos gravitacionales, especialmente en volcanes (Charbonnier *et al.*, 2013; Gueugneau, 2014; Kelfoun, 2017; Kelfoun *et al.*, 2017, 2010; Kelfoun y Druitt, 2005; Kelfoun y Vargas, 2016).

Los flujos de lodo y escombros son mezclas fluidas saturadas en agua, altamente concentradas en sedimentos y escombros. Estos se originan en las laderas altas de volcanes y montañas y pueden desplazarse rápidamente pendiente abajo por influencia de la gravedad (Vallance, 2005). Durante el tránsito de un flujo de lodo y escombros pueden ocurrir procesos de erosión o incorporación de sedimentos, segregación de partículas, dilución (flujos granulares e hiperconcentrados) y procesos deposicionales (Pierson *et al.*, 1996; Vallance, 2005). Una de las características principales de los flujos de lodo del Carihuairazo es que fueron poco erosivos. Evidencia de ello es que el estrato subyacente de ceniza de la erupción del Tungurahua 1640 A.D. no fue erosionado (Figura 2b), lo cual sugiere que los flujos tenían un comportamiento laminar en su base y eran muy viscosos (Vásquez *et al.*, 2009). Además, puesto que más del 73% de sus componentes están en el rango de arena muy fina, limos y arcillas es de

esperarse que el flujo haya tenido una alta fuerza de cohesión y que su densidad era equivalente al de las rocas densas suspendidas en él ( $>2500 \text{ kg/m}^3$ ).

Según Gueugneau (2014), los parámetros reológicos que mejor reproducen el comportamiento de los flujos de lodo y escombros desencadenados por la erupción del volcán Nevado del Ruiz en Colombia (Naranjo *et al.*, 1986) son: viscosidad 0,1-0,001 Pa.s (Iverson, 1997), densidad del flujo  $1900 \text{ kg/m}^3$  (Pierson *et al.*, 1990) y cohesión 530-800 Pa (Lowe *et al.*, 1986). Adicionalmente, Manville *et al.*, (1998) realizó un estudio a detalle de la reología de flujos de lodo y escombros de 1995 en el volcán Ruapehu en Nueva Zelanda y reporta valores de densidad de flujo de  $1780 \text{ kg/m}^3$  para flujos que mantienen en suspensión bloques de más de  $2600 \text{ kg/m}^3$ , cohesión de 1900-3400 Pa y viscosidad de Bingham de 29-93 Pa.s. En la literatura se encuentra que estos parámetros físicos varían ampliamente entre un evento y otro (Tabla 1).

**Tabla 1.** Comparación de parámetros reológicos calculados y estimados en diferentes flujos de lodo y escombros en el mundo. Tomado de Manville *et al.* (1998) después de Phillips and Davies (1991)

Ubicación	Cohesión (Pa)	Viscosidad Newtoniana (Pa.s)	Viscosidad de Bingham (Pa.s)	Referencia
Mangatoetoenui, NZ	1900-3420		29-93	Manville <i>et al.</i> , 1998
Wrightwood Canyon, USA		10-6000	40-100	Morton and Campbell, 1974
Wrightwood Canyon, USA		210-600		Sharp y Nobles, 1953
Pine Creek, Mount St Helens, USA	400-1000		20-320	Fink <i>et al.</i> , 1981
Mayflower Gulch, USA		3000		Curry, 1966
Dragon Creek, USA		2780		Cooley <i>et al.</i> , 1977
Bullock Creek, NZ	1300-2400	210-810	17-71	Pierson, 1981
Tarndale Slip, NZ	15-140			Phillips y Davies, 1991
Bullock Creek, NZ	50-300			Phillips y Davies, 1991
Mayon, Filipinas	460-2320	6500	600	Rodolfo <i>et al.</i> , 1989
Nevado del Ruiz, Colombia	530-800			Lowe <i>et al.</i> , 1986
Nevado del Ruiz, Colombia	530-800		0.1-0.001	Gueugneau, 2014

## Resultados

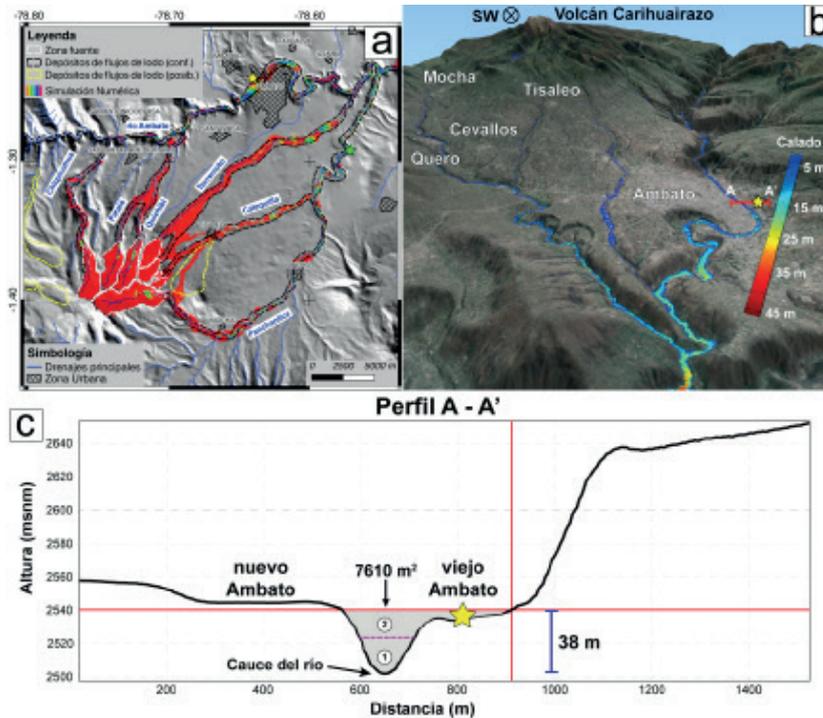
Con base en los parámetros recuperados de la bibliografía, los datos de campo e información del registro histórico, llevamos a cabo varios ensayos de prueba y error hasta encontrar la reología que mejor reproduce el evento de 1698 (Tabla 2). La Figura 3a compara el mejor resultado del modelamiento con el mapa geológico de Vásconez *et al.*, (2009). A simple vista se ve una buena congruencia entre el modelamiento y el mapeo (línea negra entrecortada), lo que nos hace confiar en el resultado de la simulación.

**Tabla 2.** Parámetros reológicos utilizados para el modelamiento de flujos de lodo utilizando el código VolcFlow

	<i>Flujos de lodo por el terremoto de 1698 (este estudio)</i>	<i>Flujos de lodo y escombros del Nevado del Ruiz-1985 (Gueugneau, 2014)</i>
MDT (m)	10	30
Tiempo de alimentación (s)	300	6300
Volumen (Mm <sup>3</sup> )	80	50
Turbulencia	0,01	0,01
Viscosidad (Pa.s)	10	0,05
Cohesión (Pa)	600	500
Densidad del flujo (kg/m <sup>3</sup> )	2000	1800

Según Vásconez *et al.* (2009), la altura media de los flujos de lodo sobre el cauce del río Ambato es de ~26m, y solo en casos excepcionales alcanzaron alturas superiores. Por ejemplo, en el sector de El Socavón o viejo Ambato (Figura 3a) el flujo alcanzó 38 m de calado, sobre un cañón de 360 m de ancho. Al comparar con el resultado de la simulación numérica encontramos valores superiores a 20 metros en este sitio (Figura 3b). Las zonas de menor pendiente, generalmente aguas abajo, tienen los mayores calados (20-45 metros), siendo claramente áreas de depositación y de menor velocidad. El perfil topográfico A-A' (Figura 3b y Figura 3c) resalta la ubicación de la antigua ciudad de Ambato (actualmente El Socavón). Esta zona fue cubierta por los flujos de lodo en 1698, alcanzando calados superiores a los 30 m. Tras el evento, la ciudad fue reubicada, al sitio actual, el cual no fue afectado por los flujos de lodo (Wolf, 1873). En el sector del Socavón los flujos cubrieron un área de 7610 m<sup>2</sup> (Figura 3c).

Con respecto a la velocidad de los flujos de lodo, Wolf (1873) menciona que llegaron en tan solo 15 minutos a la antigua ciudad de Ambato (el Socavón, Figura 3a); lo que implica una velocidad media de 29 m/s. Adicionalmente, Vásconez *et al.* (2009) propone un tiempo de entre 43 y 63 minutos para el mismo punto, considerando las rutas de los valles de Pataló (22 km) y de Chiquichua



**Figura 3.** a) Comparación del resultado de la simulación numérica con el mapa de los depósitos de los flujos de lodo de 1698 de Vásconez *et al.* (2009). b) Vista oblicua de la zona de estudio en donde se resalta el espesor de los flujos de lodo obtenidos con la simulación numérica. La estrella amarilla señala la zona del Socavón, que corresponde al sitio en donde estaba asentada la antigua ciudad de Ambato; mapa base cortesía de Google Earth. c) Perfil topográfico en el sector de la antigua ciudad de Ambato, en este sitio los flujos de lodo alcanzaron calados de 38 m sobre el cauce del río Ambato e inundaron un área total de más de 7610 m<sup>2</sup> (área sombreada). La línea fucsia entrecortada muestra el efecto amplificador de los flujos en este sector debido posiblemente al arribo de varias oleadas de lodo. Nótese que la escala vertical está exagerada para una mejor visualización.

(28 km aguas abajo), respectivamente (Figura 3a) y velocidades de 18 m/s para los gradientes escarpados y 5 m/s para el tramo transitado en el río Ambato hasta El Socavón, con una velocidad promedio de 10 m/s. Vásconez *et al.* (2009) argumenta estos resultados en base a una velocidad calculada de 12,8 m/s en el tramo inferior del río Pachanlica (Figura 2a, estrella verde). Por otro lado, nuestros resultados muestran tiempos de arribo al Socavón de entre 24 y 32 minutos con una velocidad promedio de 15,2-15,8 m/s para las rutas de los flujos de lodo de los valles de Pataló y de Chiquichua, respectivamente (Figura 3a). Además, con el modelo se obtuvo una velocidad de 8.7 m/s para el sitio en donde Vásconez *et al.* (2009) realizó su estimación. Las velocidades para los gradientes escarpados están en el orden de 17 m/s y en el tramo del río Ambato al Socavón de 13,8 m/s.

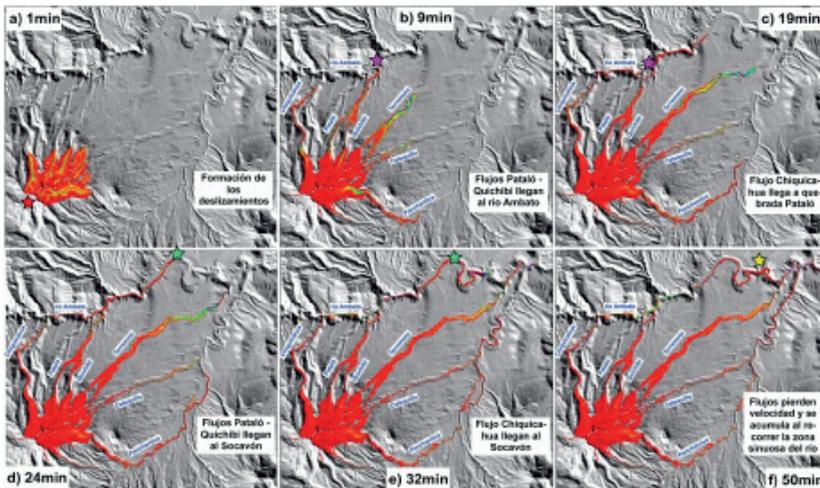
La velocidad promedio para estos flujos es de aproximadamente 15 m/s o 54 km/h. Aguas abajo del Socavón se estimaron velocidades promedio de 9,3 m/s. Vale notar que los resultados de la simulación son ligeramente superiores a los calculados previamente en campo, pero menores a los reportados en las narrativas históricas, como lo resume la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparación de los parámetros calculados para los flujos de lodo del Carihuairazo según Wolf (1873), Vásconez *et al.* 2009 y el presente trabajo.

	<i>Wolf, 1873</i>	<i>Vásconez et al., 2009</i>	<i>Este trabajo</i>
Tiempo de arribo al Socavón (min)	15	43-63	24-32
Velocidad Promedio (m/s)	29	10	12
Velocidad gradientes escarpados (m/s)		18	17
Velocidad río Ambato – Socavón (m/s)		5	13,8
Velocidad sitio calculado (m/s)		12,8	8,7
Velocidad aguas abajo del Socavón (m/s)			9,3

Vásconez *et al.* (2009) menciona que no se conoce si los volúmenes de estos tres afluentes: Qbd, Chiquicahua, Pataló y Quichibí (Figura 3a) llegaron al río Ambato de forma simultánea o separados en el tiempo. Esta interrogante fue contestada por la simulación numérica (Figura 4). Los flujos de las quebradas Pataló y Quichibí llegan de forma simultánea a la confluencia con el río Ambato después de 9 minutos de ocurrido el terremoto formando un solo frente de lodo (Figura 4b). Por otro lado, el flujo que desciende del valle de Chiquicahua arriba en 11 min a la confluencia con el río Ambato y en 19 minutos a la desembocadura de la quebrada Quichibí-Pataló formando una segunda oleada de lodo (Figura 4c). Estos dos frentes de lodo tiene una diferencia de aproximadamente 10 minutos. El primer frente de lodo proveniente de los valles de Quichibí-Pataló llegan al sector del Socavón (antigua ciudad de Ambato) 24 minutos después de ocurrido el terremoto (Figura 4d), y la segunda oleada 8 minutos más tarde (Figura 4e). Las crónicas no mencionan la ocurrencia de dos oleadas de lodo, sin embargo, los registros geológicos demuestran que en la zona cercana al Socavón los calados del flujo de lodo aumentaron de forma inusual (Figura 3c), doblando su altura inicial de 20 a 38 m (Vásconez *et al.*, 2009), a pesar de que en esta zona hay un ensanchamiento del cañon del río Ambato el cual debería dar un efecto opuesto. Puesto que el calado del flujo aumentó considerablemente en lugar

de disminuir, Vásconez *et al.* (2009) sugiere un posible represamiento del río que estaría ubicado cerca del punto de mayor calado (40 m), aguas abajo del Socavón. Por otro lado, los resultados de la simulación numérica sugieren que la primera oleada de lodo dejó un depósito que elevó el cauce del río. La primera oleada pudo tener calados moderados (<20 m) y produjo limitada destrucción (Figura 3c). Sin embargo, el segundo flujo (8 minutos después) al verse obstaculizado por los depósitos del primero, alcanzó cotas superiores, lo suficiente para enterrar las ruinas y sobrevivientes del terremoto de la antigua ciudad de Ambato (Figura 3c). Esta diferencia de tiempo de arribo entre varios flujos de lodo en un mismo punto puede explicar el efecto amplificador del área inundada y calados reportados por Vásconez *et al.* (2009). Pasados los 50 minutos los flujos se juntan en el río Cutuchi al oriente de la ciudad de Ambato (Figura 4f) y empiezan su descenso a la Amazonía, pasando junto a las ciudades de Patate y Baños, mayormente encauzados en profundos encañonados.



**Figura 4.** Reconstrucción numérica de la serie temporal del recorrido de los flujos de lodo ocurridos tras el terremoto de Ambato de 1698 utilizando el código VolcFlow. Note que la estrella destaca la zona de arribo del flujo descrita en cada figura.

## Discusión de resultados y perspectivas a futuro

### ***Mecanismo generador de los flujos de lodo del Carihuairazo de 1698***

Para la generación de los enormes flujos de lodo del Carihuairazo dos fenómenos naturales jugaron un rol importante; un sismo de gran magnitud y suelos de páramo saturados en agua (lluvias). Para el primero, Baize *et al.* (2015) demuestra que uno de los tramos de la falla de Pallatanga cruza bajo los volcanes Chimborazo-Carihuairazo, y que este fue el causante del terremoto de 1698 y, de otros terremotos que han sido muy destructivos en esta región. Durante el

periodo de 1587 a 1996, en un radio menor a 80 km alrededor del Carihuairazo, han ocurrido siete sismos de magnitud superior a  $6M_{IC}$  de los cuales tres fueron mayores a  $7M_{IC}$ , los cuales ocurrieron a una profundidad máxima estimada de 10 km (Beauval *et al.*, 2010). La falla de Pallatanga y sus tramos son de tipo *strike-slip* y forman parte del sistema de fallas que mueven al bloque nor-andino a una velocidad promedio de 2.5 mm/año (Baize *et al.*, 2015).

Por otro lado, los suelos de páramo son conocidos por almacenar grandes cantidades de agua de lluvia, siendo junio uno de los últimos meses de invierno en Ecuador. Además, en altitudes superiores a los 4000 msnm es común encontrar pequeñas lagunas y turberas que almacenan grandes cantidades de agua. Tal es el rol de estos dos componentes que siempre se conjugan para la formación de estos eventos como lo demuestran los registros históricos (Hall, 2000; Kolberg, 1977; Stübel and Reiss, 1987; Wolf, 1873). Sismos de gran magnitud ( $>7M_w$ ) inducen deslizamientos en suelos de páramo ( $>4000$  msnm) que al estar saturados de agua incrementan la probabilidad de formar grandes flujos de lodo, convirtiéndose en un escenario de multi-amenaza y de efecto en cascada. Eventos de esta naturaleza han ocurrido en otras partes del mundo como los reportados en el volcán Popocatepelt (2017) en México, tras el terremoto de 7.1Mw de Puebla-Morelos (Coviello *et al.*, 2021).

### ***Simulación numérica de flujos de lodo y escombros***

La simulación numérica constituye una herramienta poderosa para la reconstrucción de eventos pasados y la identificación de áreas afectadas, ésta además permite pronosticar áreas posiblemente afectadas en escenarios futuros. Por otro lado, los resultados de los modelos deben ser entendidos bajo el contexto de sus incertidumbres. En nuestro estudio, el código VolcFlow es un modelo determinístico que utiliza los principios de conservación de la masa y el *momentum* para fluidos gravitacionales bajo ciertos criterios reológicos (Kelfoun y Druitt, 2005). Estos parámetros reológicos son difíciles de cuantificar durante el emplazamiento de estos fenómenos ya que son muy peligrosos e impredecibles y por ello, varios de los parámetros físicos han sido estimados estudiando los depósitos dejados por eventos pasados o bajo condiciones de laboratorio (Iverson, 1997; Phillips y Davies, 1991). Estas limitaciones generan incertidumbres intrínsecas al fenómeno que luego son llevadas al modelo. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta que la reología del flujo cambia con el tiempo, es decir, no es constante, convirtiéndose en una limitación por la falta de conocimiento, que de igual manera es incorporada al modelo y sus resultados. Por otro lado, es necesario conocer la calidad del modelo digital de terreno (MDT) que se va a utilizar en la simulación; este debe reproducir la topografía lo mejor posible. El resultado de la simulación está vinculado directamente a la calidad del modelo de terreno (Marrero *et al.*, 2018). Finalmente, el resultado del modelamiento por sí solo no significa nada, si no ha sido validado con datos de campo o registros escritos del fenómeno.

En este estudio, la mayoría de las quebradas son grandes encañonados de varias decenas de metros de profundidad (Figura 3b y 3c) y por tanto los resultados de las simulaciones para flujos de lodo y escombros (flujos gravitacionales) siempre estarán restringidos dentro de las escarpadas paredes que bordean el río. Solo en áreas específicas los flujos se desbordan después de alcanzar el calado necesario (p.e. sector de El Socavón, Figura 3c). Por estas razones no hay mayor diferencia en los resultados de las simulaciones al cambiar los parámetros reológicos del flujo y por ello los valores presentados en este estudio deben ser tomados con cuidado, ya que no reflejan el comportamiento de cualquier flujo de lodo; en zonas con pendientes menores podría generar mayores diferencias e incertidumbres, lo cual no sucede en este ensayo.

### ***Infraestructura crítica expuesta***

Hoy en día, zonas pobladas, vías de primer y segundo orden y sistemas de captación, tratamiento y distribución de agua potable y de riego están instaladas en las orillas del río Ambato (Figura 5). En el posible caso de que ocurran nuevos flujos de lodo, la infraestructura y población expuesta serán total o parcialmente afectada. Un gran número de personas sufrirían daños directa e indirectamente. En caso de afectación directa individuos, cultivos, animales e infraestructura (escuelas, casas, etc.) podrían ser enterrados por los flujos de lodo, como ya sucedió en 1698. Mientras que, en afectación indirecta, poblaciones podrían quedar incomunicadas por la destrucción de puentes y carreteras, y un número muy elevado de personas quedarían sin acceso a agua potable, incluso en zonas muy alejadas del río Ambato y sufrirían los estragos del evento por varios días o semanas. Vale señalar que el sistema de agua potable actual está concentrado en esta zona muy peligrosa y eso lo hace altamente vulnerable. Por ello es importante plantearse la necesidad de construir sistemas complementarios fuera de esta zona de peligro, generando redundancia del sistema de agua potable.

Actualmente hay dos proyectos de agua potable y de riego funcionando en las pendientes altas del volcán extinto Casahuala, ubicado inmediatamente al norte del río Ambato (Figura 2a y Figura 5). Los proyectos multipropósito Chiquiurco y Mulacorral, son dos grandes represas que almacenan 3 Mm<sup>3</sup> de agua del páramo cada uno. El agua es tratada y distribuida como potable y para riego para las ciudades de Ambato y Pelileo (>200 mil personas) desde hace 10 años. Vásconez *et al.* (2009), indica que posiblemente flujos de lodo se generaron también en el volcán Casahuala después del terremoto de 1698, los cuales descendieron por el río Calamanca hasta llegar al río Ambato (Figura 2a y Figura 5). Con esto en mente y bajo las circunstancias actuales es necesario plantearse la posibilidad de que un gran terremoto pudiese romper las dos represas, generando dos grandes oleadas que se unirían aguas abajo en el río Calamanca y posteriormente en el río Ambato afectando a las poblaciones e infraestructura crítica asentada a sus orillas. El sistema de fallas en el sector de Riobamba y Ambato históricamente ha demostrado que tiene la capacidad de generar sismos de magnitudes mayores

a 6Mw (Beauval *et al.*, 2013, 2010; Yepes *et al.*, 2016) y por ello es importante considerar este fenómeno como un factor potencial para la ruptura de represas de agua en zonas altas. Estas son razones de sobra para trabajar en el corto y mediano plazo en la elaboración de medidas de mitigación, sistemas de alerta temprana, protocolos de evacuación y sobretodo educar a la población cercana sobre el potencial riesgo de vivir a orillas del río Ambato.

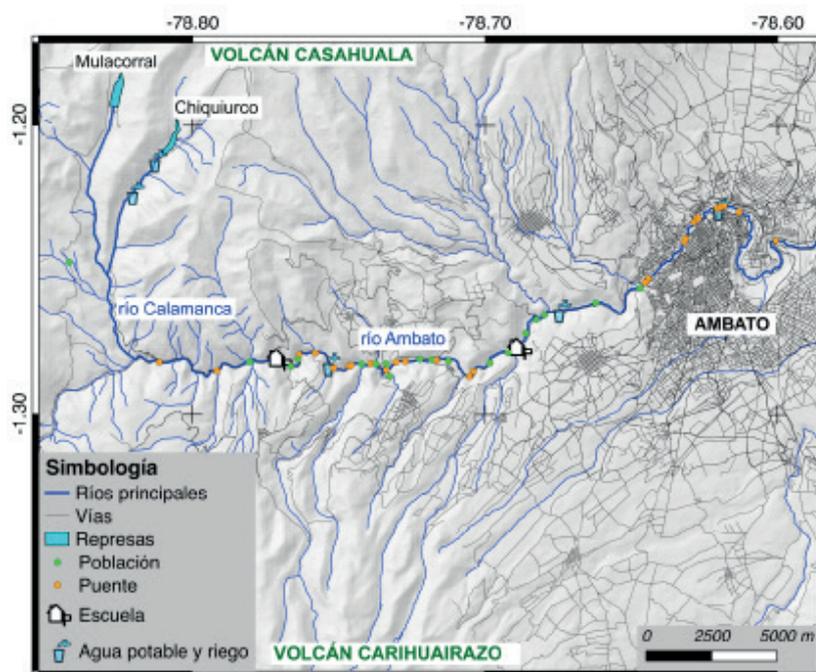


Figura 5. Mapa de infraestructura crítica y poblaciones expuestas a potenciales flujos de lodo a lo largo de las orillas del río Ambato.

## Conclusiones

- El modelamiento numérico validado, permitió reconstruir los flujos de lodo del Carihuairazo desencadenados por el terremoto de Ambato de 1698. Los resultados obtenidos se asemejan a los datos geológicos y relatos históricos, tanto en valores de calado, como de velocidad (Tabla 3).
- Se estimaron tiempos de arribo para el sector de El Socavón (antigua ciudad de Ambato) de entre 24 y 32 minutos, velocidades promedio de 15 m/s y calados de entre 5-45 metros en el cauce del río Ambato.
- La simulación además permitió identificar la formación de dos frentes de lodo que confluyen en la antigua ciudad de Ambato con 8 minutos de diferencia. La ocurrencia de estos dos frentes causó un efecto amplificador en el calado de

los flujos (Figura 3c), lo que incrementó el daño y enterró con lodo la antigua ciudad de Ambato hace más de 300 años.

- Hoy en día, grandes represas de agua se han construido en las laderas altas del volcán Casahuala. Estas están expuestas a la ocurrencia de eventos sísmicos de magnitudes mayores a 6 Mw (Baize *et al.*, 2015), lo que podría dañarlas gravemente e inducir la formación de grandes flujos de lodo que afectarían las poblaciones e infraestructura de agua potable y para riego construidas a las orillas del río Ambato, dejando sin agua por varios días o semanas a sectores muy poblados como las ciudades de Ambato y Pelileo (>200 mil personas).

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la prefectura de Tungurahua por la invitación ha conocer las represas Mulacorral y Chiquirco y toda la infraestructura del sistema de agua potable y para riego a lo largo del río Ambato. Un agradecimiento especial a Gabriela Labre, organizadora del evento, quien preocupada por la alta exposición de esta infraestructura pidió nuestro asesoramiento. Agradecimiento también a Anais Vásconez Müller por el acompañamiento durante la visita técnica y por las ideas y sugerencias durante la escritura de este artículo. Esta investigación fue llevada a cabo en el contexto del proyecto “Generación de Capacidades para la Emisión de Alertas Tempranas” del Instituto Geofísico de Escuela Politécnica Nacional financiado por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES), Ecuador.

## Referencias

- Baize, S., Audin, L., Winter, T., Alvarado, A., Pilatasig Moreno, L., Taipe, M., Reyes, P., Kauffmann, P., Yepes, H. (2015). Paleoseismology and tectonic geomorphology of the Pallatanga fault (Central Ecuador), a major structure of the South-American crust. *Geomorphology*, 237, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.030>
- Barriga López, F. (2015). *Historia de los desastres naturales en el Ecuador: erupciones volcánicas, terremotos, cataclismos, tsunamis, inundaciones y más*. Academia Nacional de Historia del Ecuador e Instituto Panamericano de Geografía e Historia Sección Nacional del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Beauval, C., Yepes, H., Bakun, W. H., Egred, J., Alvarado, A., Singaicho, J.-C. (2010). Locations and magnitudes of historical earthquakes in the Sierra of Ecuador (1587-1996). *Geophysical Journal International*, 181(3), 1613-1633. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04569.x>
- Beauval, C., Yepes, H., Palacios, P., Segovia, M., Alvarado, A., Font, Y., Aguilar, J., Troncoso, L., Vaca, S. (2013). An Earthquake Catalog for Seismic Hazard Assessment in Ecuador. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(2A), 773-786. <https://doi.org/10.1785/0120120270>
- Charbonnier, S. J., Germa, A., Connor, C. B., Gertisser, R., Preece, K., Komorowski, J.-C., Lavigne, F., Dixon, T., Connor, L. (2013). Evaluation of the impact of the 2010 pyroclastic

- density currents at Merapi volcano from high-resolution satellite imagery, field investigations and numerical simulations. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 261, 295-315.
- Cooley, M. E., Aldridge, B. N., Euler, R. C. (1977). *Effects of the catastrophic flood of December 1966, North Rim area, eastern Grand Canyon, Arizona*. US Govt. Print. Off.
- Coviello, V., Capra, L., Norini, G., Dávila, N., Ferrés, D., Márquez-Ramírez, V.H., Pico, E. (2021). Earthquake-induced debris flows at Popocatepetl Volcano, Mexico. *Earth Surf. Dynam.*, (9), 393-412. <https://doi.org/10.5194/esurf-9-393-2021>
- Curry, R. R. (1966). Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, central Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, (77), 771-776.
- Darnell, A. R., Phillips, J. C., Barclay, J., Herd, R. A., Lovett, A. A., Cole, P. D. (2013). Developing a simplified geographical information system approach to dilute lahar modelling for rapid hazard assessment. *Bulletin Volcanology*, 75(713). <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0713-6>
- Fink, J. H., Malin, M. C., D'Alli, R. E., Greeley, R. (1981). Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington. *Geophysical research letters*, 8, 43-46.
- Gueugneau, V. (2014). Evaluation du logiciel VolcFlow pour la simulation numérique de lahars et application aux risques associés. *Rapport de Travail d'Etude et de Recherche (TRE)*. Université Blaise Pascal Clermont II. France, 25 pp.
- Hall, M. (2000). Los terremotos del Ecuador del 5 de marzo del 1987, Deslizamientos y sus efectos socioeconómicos. *Estudios de Geografía*, 9.
- Hall, M. L., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Johnson, J. B. (2008). Ecuadorian Andes volcanism: A review of Late Pliocene to present activity. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.012>
- INEC (2020). Proyección de la población ecuatoriana, por años calendario, según cantones 2010-2020 [WWW Document]. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Iverson, R. M. (1998). Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America Bulletin*, 14.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics* 35, 245-296.
- Kelfoun, K. (2017). A two-layer depth-averaged model for both the dilute and the concentrated parts of pyroclastic currents: A Model For Pyroclastic Currents. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 4293-4311. <https://doi.org/10.1002/2017JB014013>
- Kelfoun, K., Druitt, T. H. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110.
- Kelfoun, K., Giachetti, T., Labazuy, P. (2010). Landslide-generated tsunamis at Réunion Island. *Journal of Geophysical Research*, 115. <https://doi.org/10.1029/2009JF001381>
- Kelfoun, K., Gueugneau, V., Komorowski, J.-C., Aisyah, N., Cholik, N., Merciecca, C. (2017). Simulation of block-and-ash flows and ash-cloud surges of the 2010 eruption of Merapi volcano with a two-layer model: MODEL OF THE 2010 ERUPTION OF MERAPI. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 4277-4292.

- <https://doi.org/10.1002/2017JB013981>
- Kelfoun, K., Vargas, S. V. (2016). VolcFlow capabilities and potential development for the simulation of lava flows. *Geological Society, London*, 426, 337-343.  
<https://doi.org/10.1144/SP426.8>
- Kolberg, J. (1977). *Hacia el Ecuador: (Nach Ecuador): relatos de viaje*. Traducido de la IV edición alemana por F. Yepez Arboleda, Cuarta, Alemania 1807. ed. República Federal de Alemania y Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.
- Le Pennec, J.-L., Jaya, D., Samaniego, P., Ramón, P., Moreno Yáñez, S., Egred, J., van der Plicht, J. (2008). The AD 1300–1700 eruptive periods at Tungurahua volcano, Ecuador, revealed by historical narratives, stratigraphy and radiocarbon dating. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 70-81.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.05.019>
- Lowe, D. R., Williams, S. N., Leigh, H., Connort, C. B., Gemmill, J. B., Stoiber, R. E. (1986). Lahars initiated by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia. *Nature*.
- Manville, V., Hodgson, K. A., White, J. D. L. (1998). Rheological properties of a remobilised-tephra lahar associated with the 1995 eruptions of Ruapehu volcano, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 41, 157-164.  
<https://doi.org/10.1080/00288306.1998.9514800>
- Marrero, J. M., Vasconez, F., Espín, P., Ortiz, R., Yepes, H., García, A., Mothes, P., Estrella, C. (2018). MDTanaliza: understanding digital elevation models when facing gravity-driven flows in a hazard assessment context. *Earth Science Informatics*.  
<https://doi.org/10.1007/s12145-018-0372-4>
- Metropolis, N., Ulam, S. (1949). The monte carlo method. *Journal of the American Statistical Association*, 44, 335-341.
- Morton, D. M., Campbell, R. H., 1974. Spring mudflows at Wrightwood, southern California. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 7, 377-384.
- Naranjo, J. L., Sigurdsson, H., Carey, S.N., Fritz, W. (1986). Eruption of the Nevado del Ruiz volcano, Colombia, on 13 November 1985: tephra fall and lahars. *Science*, 233, 961-963.
- Ordóñez, J., Hall, M., Samaniego, P. (2011). Erupciones volcánicas del Pleistoceno tardío alrededor de Ambato: caracterización y distribución de sus depósitos. *Séptimas Jornadas de Ciencias de la Tierra* 6.
- Phillips, C. J., Davies, T. R. (1991). Determining rheological parameters of debris flow material. *Geomorphology*, 4, 101-110.
- Pierson, T. C. (1981). Dominant particle support mechanisms in debris flows at Mt Thomas, New Zealand, and implications for flow mobility. *Sedimentology*, 28, 49-60.
- Pierson, T. C., Daag, A. S., De los Reyes, P. J., Regalado, M. T. M., Solidum, R. U., Tubianosa, B. S. (1996). Flow and deposition of posteruption hot lahars on the east side of Mount Pinatubo. *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines*, 921-950.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. -C., Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia,

- and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, 17-66.
- Rodolfo, K. S., Arguden, A. T., Solidum, R. U., Umbal, J. V. (1989). Anatomy and behaviour of a post-eruptive rain lahar triggered by a typhoon on Mayon Volcano, Philippines. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, 40, 55-66.
- Samaniego, P., Barba, D., Robin, C., Fornari, M., Bernard, B. (2012). Eruptive history of Chimborazo volcano (Ecuador): A large, ice-capped and hazardous compound volcano in the Northern Andes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 221, 33-51.
- Sandri, L., Tierz, P., Costa, A., Marzocchi, W. (2018). Probabilistic Hazard From Pyroclastic Density Currents in the Neapolitan Area (Southern Italy). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 3474-3500. <https://doi.org/10.1002/2017JB014890>
- Schilling, S.P. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. *US Geological Survey, Information Services* [distributor].
- Schubert, C., Clapperton, C. M. (1990). Quaternary glaciations in the northern Andes (Venezuela, Colombia and Ecuador). *Quaternary Science Reviews* 9, 123-135.
- Sharp, R. P., Nobles, L. H. (1953). Mudflow of 1941 at Wrightwood, southern California. *Geological Society of America Bulletin*, 64, 547-560.
- Stübel, A., Reiss (1987). Las montañas volcánicas del Ecuador. Retratadas y descritas geológica-topográficamente. UNESCO (Ed.): Archivo Histórico del Banco Central del Ecuador.
- Tierz, P., Sandri, L., Costa, A., Zaccarelli, L., Di Vito, M.A., Sulpizio, R., Marzocchi, W. (2016). Suitability of energy cone for probabilistic volcanic hazard assessment: validation tests at Somma-Vesuvius and Campi Flegrei (Italy). *Bulletin of Volcanology*, 78. <https://doi.org/10.1007/s00445-016-1073-9>
- Vallance, J. W. (2005). Volcanic debris flows. In *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, pp. 247-274.
- Vásconez, R., Hall, M., Mothes, P. A. (2009). Devastadores flujos de lodo disparados en el volcán Carihuairazo por el terremoto del 20 de Junio de 1698. *Revista Politécnica*, 20.
- Wolf, T. (1873). *Crónica de los fenómenos volcánicos y terremotos en el Ecuador con algunas noticias sobre otros países de la América Central y Meridional desde 1535 hasta 1797*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Yepes, H., Audin, L., Alvarado, A., Beauval, C., Aguilar, J., Font, Y., Cotton, F. (2016). A new view for the geodynamics of Ecuador: Implication in seismogenic source definition and seismic hazard assessment: Ecuador Geodynamics and PSHA. *Tectonics*, 35, 1249-1279. <https://doi.org/10.1002/2015TC003941>