



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: [www.sgp.org.pe](http://www.sgp.org.pe) ISSN 0079-1091

## Resultados preliminares de simulaciones de flujos piroclásticos en la actualización del mapa de peligros del volcán Misti - Arequipa

K. Cueva<sup>1</sup>, C. Arias<sup>1</sup>, J. Mariño<sup>1</sup>, J. Cuno<sup>1</sup>, A. Ancalle<sup>1,2</sup>, Y. Soncco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geológico Minero y Metalúrgico-INGEMMET, Observatorio Vulcanológico del INGEMMET.

<sup>2</sup>Universidad Nacional de San Agustín - Arequipa

### RESUMEN

El volcán Misti, ubicado en la región de Arequipa, ha registrado múltiples episodios de flujos piroclásticos, durante su evolución geológica desde hace 48 ka. Estos depósitos se han encausado por las quebradas San Lázaro, Huarangal, El Chical, en los márgenes del río Chili, etc., llegando a tener espesores de hasta 30 m. Se ha usado el código de VolcFlow desarrollado por Kelfoun en el Laboratorio de Magmas y Volcanes en Francia, para poder simular los flujos piroclásticos que emitiría el volcán Misti en una posible reactivación, considerando sus escenarios eruptivos generadores de peligros.

Las simulaciones se han realizado tomando como base DEM's de 4 y 10 m/píxeles de la zona de Arequipa. Los flujos piroclásticos están emplazados preferencialmente en las quebradas que descienden del volcán. Con los datos de Harpel et al., 2011, Cobeñas et al., 2012, Mariño et al., 2016 y Charbonnier et al., 2020, se han considerado volúmenes de flujos piroclásticos como referencia en nuestras simulaciones representados en, donde se calcula como el área multiplicado por el espesor del depósito.

Se han establecidos escenarios eruptivos, considerando una erupción de tipo Vulcaniana (alto peligro), sub-Pliniana (medio) y Pliniana (bajo). Se ha tomado en cuenta los inputs de modelamiento

de volcanes análogos (¿volcanes o erupciones?) de la Zona Volcánica Central de los Andes, junto con el trabajo de Kelfoun (2009) en Tungurahua. Se han realizado simulaciones en el Cañón del Río Chili (87 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), Quebrada San Lázaro (89 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), Quebrada Huarangal (21 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), Quebrada Agua Salada (42 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>), los cuales contribuirán con la actualización del mapa de peligros por flujos piroclásticos del volcán Misti, que se presentará más adelante.

**PALABRAS CLAVE:** Misti, flujos piroclásticos, VolcFlow, mapa de peligros.

### ABSTRACT

The Misti volcano, located in the Arequipa region, has registered multiple episodes of pyroclastic flows, during its geological evolution for 48 ka. These deposits have been channeled by the San Lázaro, Huarangal and El Chical streams, on the banks of the Chili River, etc., reaching thicknesses of up to 30 m. The VolcFlow Code developed by Kelfoun in the Magmas and Volcanoes Laboratory in France has been used to simulate the pyroclastic flows that the Misti volcano would emit in a possible reactivation, considering its eruptive scenarios that generate dangers.

The simulations have been carried out taking as a basis DEM's of 4 and 10 m / pixels of the Arequipa area. Pyroclastic flows are preferentially located

ed in the streams that descend from the volcano. With the data from Harpel et al., 2011, Cobeñas et al., 2012, Mariño et al., 2016 and Charbonnier et al., 2020, volumes of pyroclastic flows represented in, where it is calculated as the area multiplied by the thickness of the deposit.

Eruptive scenarios have been established, considering an eruption of the Vulcanian (high), sub-Plinian (medium) and Plinian (medium) type. The modeling inputs of analogous volcanoes of the Central Volcanic Zone of the Andes have been taken into account, together with the work of Kelfoun (2009) in Tungurahua. Simulations have been carried out in the Chili River Canyon ( $87 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), Quebrada San Lázaro ( $89 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), Quebrada Huarangal ( $21 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), Quebrada Agua Salada ( $42 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), which will contribute to the hazard map by pyroclastic flows from the Misti volcano, which will be presented later.

**KEYWORDS:** Misti, pyroclastic flows, Volc-Flow, hazard map.

## INTRODUCCIÓN:

El estratovolcán Misti (8305000 N y 242900 E) está ubicado a 18 km de la plaza principal de la ciudad de Arequipa al sur del Perú, en la zona volcánica central de los Andes (ZVCA).

Los flujos piroclásticos o corrientes piroclásticas de densidad (PDC por sus siglas en inglés) son los peligros volcánicos más destructivos conocidos (Tilling & Beate, 1993). Son nubes ardientes de roca y gases producto de erupciones explosivas, con temperaturas de  $300^\circ\text{C}$  a  $800^\circ\text{C}$  y velocidades entre 100 y 300 m/s (Hoblitt et al., 1995), que se movilizan a ras del suelo.

Según el Boletín de la Geología y Mapa de Peligros del volcán Misti (Mariño et al., 2016), el Misti ha presentado episodios eruptivos efusivos y explosivos. Se han registrados flujos piroclásticos desde hace 48 ka, 38 ka (Thouret et al., 2005), siendo el último hace 2050 años A.P. (Thouret et al., 2011).

Las zonas propensas a ser afectada por flujos piroclásticos se han plasmado en el Mapa de Peligros del volcán Misti (Mariño et al., 2016). INGEMMET viene desarrollando desde el 2020, la actualización de este mapa, donde se presentará el Mapa de Peligros por Flujos Piroclásticos del volcán Misti de manera independiente al igual que los demás peligros. por separado.

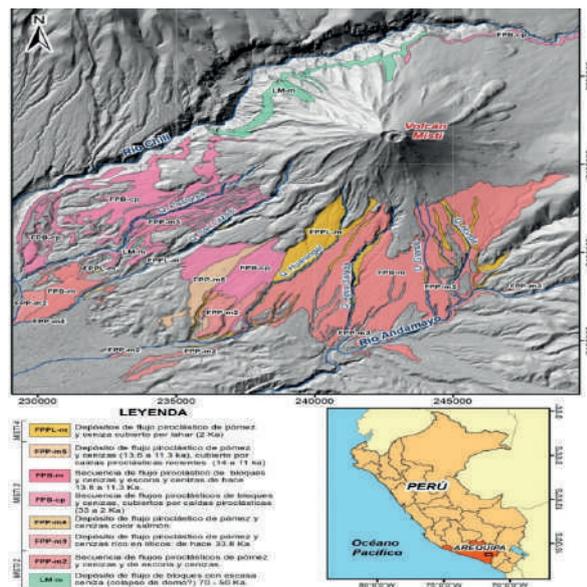


Figura 1. Mapa de ubicación de los depósitos de flujos piroclásticos en Arequipa, cartografiados en el boletín de INGEMMET "Geología y Mapa de Peligros del Volcán Misti" por Mariño et al. (2016).

## METODOLOGÍA

Se ha utilizado el código VolcFlow en el software MatLab, diseñado para simular la trayectoria de un flujo desde una fuente como punto de inicio (Kelfoun, 2009). Se ha usado para simulaciones por flujos piroclásticos por colapso de columna en los volcanes Tungurahua en Ecuador, El reventador en Ecuador, Sara Sara en Perú y San Pedro en Chile, etc.

La mayoría de los modelos de flujos granulares se basan en este modelo, el cual es compatible con las evidencias de terreno de la mayoría de las avalanchas de escombros y de flujos piroclásticos densos (Kelfoun, 2009; Cárdenas et al. 2013; Soncco, 2017).

### Preparación del DEM:

Para las simulaciones se han utilizado DEM's de 4 y 10 m/píxeles obtenidos por imágenes satelitales Pleiades y SPOT proporcionados por el CONIDA. Para tratar al DEM, se usan distintos softwares como el ArcMap y sus herramientas de ArcTool-Box, Surfer para poder obtener el formato GRD Surfer 6 Binary Grid (.grd), ya que en este formato el programa VolcFlow puede reconocer el DEM.

Para la definición de la fuente, punto de inicio del flujo, es representado un archivo (.tif) procesado por Adobe Photoshop.

**Estimaciones de volúmenes de flujos piroclásticos:**

Según el registro geológico en el volcán Misti (Mariño et al. 2016), se calcularon volúmenes de PFs antiguos en 6,833690.411 m<sup>3</sup> y 87,440573.55 m<sup>3</sup>. Estos datos se irán completando con trabajos de campo. El rango de volúmenes de entrada considera las redes de drenaje, incluido el canal principal y sus afluentes. Se han tomado en cuenta también los datos de flujos piroclásticos de la erupción de hace 2050 años, tomando volúmenes promedio a partir del mínimo y máximo sectorial en todo el volcán propuesto por Charbonnier et al., (2020). Se han usado también información de volúmenes de Harpel et al. (2011), Cobeñas et al. (2012). Los flujos piroclásticos están emplazados preferencialmente en las quebradas (depósitos densos) y en las planicies (depósitos diluidos) que descienden del volcán. El volumen de cada polígono (delimitación del depósito de flujo piroclástico) se calcula como el área multiplicado por el espesor del depósito.

Volcán	Volcán Sara Sara Perú	Volcán San Pedro Chile (11 533 yr BP)	El Reventador Ecuador (2002)	Tungurahua Ecuador (2006)
IEV	IEV 4	IEV 4-5	IEV 4	IEV 3
Volumen	3x10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	5 x 10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>	3x10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	5 x 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>
Alcance	10 - 12 km	>12 km	10 - 12 km	<10 km

Tabla 1. Volúmenes considerados en volcanes análogos en Sudamérica y en los cuales se utilizó el código VolcFlow.

Es importante definir volúmenes generales a partir de distintos escenarios eruptivos para flujos piroclásticos en el volcán Misti, considerando una erupción de tipo Vulcaniano (alto), sub-Pliniano (medio) y Pliniano (bajo), para la elaboración de un mapa de peligros.

Vulcaniana (IEV 2)	Sub-Pliniana (IEV 3)	Pliniana (IEV 4-5)
5x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	5 x 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup>	5 x10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup>

Tabla 2. Estimación de volumen en el volcán Misti para los escenarios eruptivos de IEV 2, 3 - 4 y 4- 5.

**Inputs de modelamiento**

Se ha tomado en cuenta los parámetros utilizados en los volcanes Sara Sara (Soncco, 2017), San Pedro (Alcozer, 2021), Atacazo – Ninahuilca (Proaño, 2018), El reventador (Bernard, 2016) y Tungurahua (Kelfoun, 2009), donde se realizaron simulaciones con el VolcFlow, tomando como guía la erupción del volcán Tungurahua del 2006 que trabajo Kelfoun et al. (2009). De esta manera

poder determinar los parámetros a usar en nuestra simulación.

Parámetro	Unidad	Rio Chili	Quebrada San Lázaro	Quebrada Huarangal	Quebrada Agua Salada
Tiempo de alimentación (Talm)	s	2700	2700	2700	2700
Max. hora del cálculo (T max)	s	3000	3000	3000	3000
Cohesión	Pa	2000	2000	2000	2000
Densidad de flujo	rho	1600	1600	1600	1600
Volumen	m <sup>3</sup>	87 x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	39 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	21 x106 m <sup>3</sup>	42 x106 m <sup>3</sup>

Tabla 3. Principales parámetros ingresados a los scripts del código VolcFlow para la simulación de los flujos piroclástico las quebradas que descienden del volcán Misti. Otra tabla si es necesario o solo texto

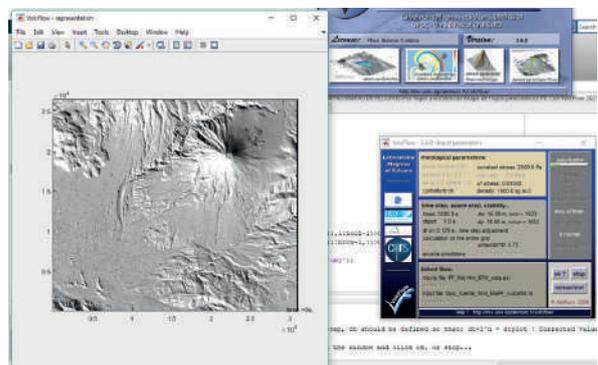


Figura 2. (Izquierda) Modelo de Elevación Digital de Arequipa, (Derecha) Interfaz de VolcFlow (Kelfoun et al., 2009).

**RESULTADOS**

Estas simulaciones preliminares muestran la dinámica de desplazamiento de los flujos piroclásticos que descienden del volcán Misti, el cual facilita su movimiento hacia la ciudad de Arequipa.

**Cañón del río Chili:** En esta zona se tomó el volumen de 87 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, de una erupción con IEV 4 – 5 tipo Pliniana. Se puede observar que la zona carece de obstáculos y por la topografía facilitó su dispersión y su llegada al río Chili. Teniendo un alcance entre 20 y 25 km por la naturaleza del volumen (Figura 3a).

**Quebrada San Lázaro:** En esta zona se tomó el volumen de 89 x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, de una erupción con IEV 4 – 5 tipo Pliniana. Se puede observar que por la naturaleza del volumen se desborda hacia quebradas menores expandiéndose y que no presenta obstáculos en este recorrido aproximado de 15 km.

**Quebrada Huarangal:** Para la simulación se ubicó el origen a ~1 km del cráter como parte alta de la naciente de la quebrada. Volumen calculado de  $21 \times 10^6 \text{ m}^3$ , de una erupción con IEV 4 – 5 tipo Pliniana, teniendo un alcance de hasta 17 km.

**Quebrada Agua Salada:** Se ubicó el origen al borde sur del cráter en la parte alta de la naciente de la quebrada. Volumen calculado de  $42 \times 10^6 \text{ m}^3$ , de una erupción con IEV 4 – 5 tipo Pliniana, teniendo un alcance de ~11 km solo en esta quebrada y ~20 km por el río Andamayo.

**Sería bueno agregar una general (50M ejm.)**

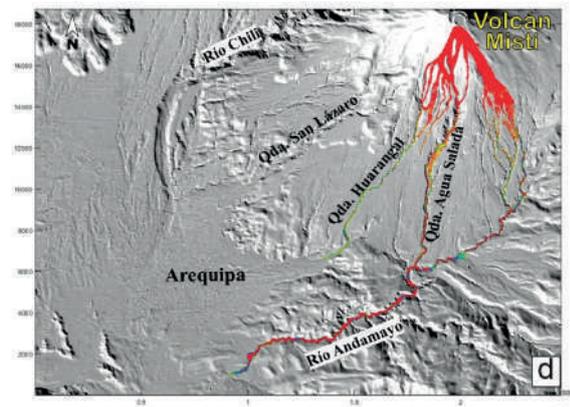
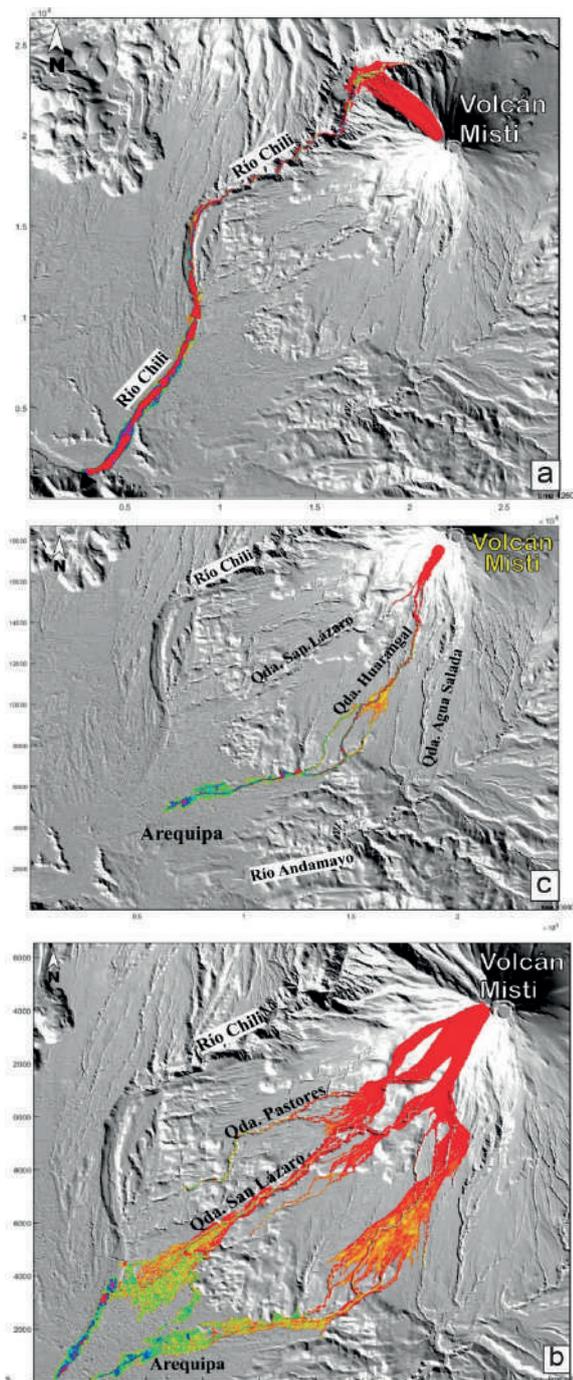


Figura 3. a) Simulación del Río Chili. b) Simulación de la quebrada San Lázaro. c) Simulación de la quebrada Huarangal. d) Simulación de la quebrada Agua Salada.

## CONCLUSIONES

El modelamiento de peligros volcánicos permite recrear la dinámica eruptiva en base de leyes físicas y modelos numéricos probabilísticos, de tal forma poder simular cuales serían las zonas de afectación ante una eventual erupción volcánica, en este caso de flujo piroclásticos en el Misti.

Tomando en cuenta los volúmenes calculados, en base al registro geológico de flujos piroclásticos emplazada en la evolución geológica del Misti, además de datos tomados de otros volcanes análogos de la ZVCA, se han realizado simulaciones en el Cañón del Río Chili ( $87 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), quebrada San Lázaro ( $39 \times 10^6 \text{ m}^3$ ), Huarangal ( $21 \times 10^6 \text{ m}^3$ ) y Agua Salada ( $42 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

Se han realizado las primeras simulaciones de flujos piroclásticos del volcán Misti en el cañón del río Chili, las quebradas San Lázaro, Huarangal y Agua Salada, con el propósito de que los resultados se asemejen más a la realidad cartografiada en campo, pudiéndose comparar con futuras simulaciones en otras quebradas y en el área en general del volcán para un trabajo más óptimo con resultados más precisos.

## REFERENCIAS

Alcozer, N. (2021). Volcanic hazard assessment through numerical simulation of eruptive scenarios at the San Pedro volcano, Northern Chile. Tesis de geología. Universidad Católica Del Norte. Antofagasta, Chile.

Bernard, J., (2016). Modeling potential hazard zones of El Reventador volcán (Ecuador): fountain- and cone-collapse pyroclastic flows vs. cone

landslide – resumen extendido-cities on volcánes  
9 “Puerto Varas Chile”

Cárdenas, E., Porras, P., Morales, Luz. (2013). Empleo del programa volcflow para simular flujos piroclásticos del volcán Cerro Machín, Tolima, Colombia.

Charbonnier, S. J., Thouret, J-C., Gueugneau V., Constantinescu R. (2020). New Insights Into the 2070calyrBP Pyroclastic Currents at El Misti Volcano (Peru) From Field Investigations, Satellite Imagery and Probabilistic Modeling. doi: 10.3389/feart.2020.557788

Harpel, C.J.; De Silva, S.L. & Salas, G. (2011). The 2ka eruption of Misti volcano, southern Peru – the most recent plinian eruption of Arequipa’s iconic volcano. Boulder, CO: Geological Society of America, 72 p. Special Paper, 484.

Hoblitt, R.P.; Walder, J.S.; Driedger, C.L.; Scott, K.M.; Pringle, P.T. & Vallance, J.W. (1995) - Volcano hazards from Mount Rainier, Washington. U.S. Geological Survey, Open File Report 95-273, 10 p.

Kelfoun, K., Samaniego, P., Palacios, P., and Barba, D. (2009). Testing the suitability of frictional behaviour for pyroclastic flow simulation by comparison with a well-constrained eruption at Tungurahua volcano (Ecuador). Bull. Volcanol 71, 1057–1075. doi:10.1007/s00445-009-0286-6

Mariño, J., Rivera, M., Thouret, J.C., Macedo, L. (2016). Geología y Mapa de Peligros del Volcán Misti. Boletín Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica N° 60. INGEMMET. Lima. Perú.

Proaño, A. (2018). Elaboración del mapa de peligros para el complejo volcánico Atacazo - Ninahuilca. Tesis de Ingeniero. Escuela politécnica nacional. Quito, Ecuador.

Soncco, Y. (2017). Evaluación de peligros volcánicos del volcán Sara Sara. Tesis de Ingeniero. Universidad Nacional de San Agustín. Arequipa

Thouret, J.C.; Finizola, A.; Fornari, M.; Legeley-Padovani, A.; Suni, J. & Frechen, M. (2001). Geology of El Misti volcano near the city of Arequipa, Peru. Geological Society of America Bulletin, 113(12): 1593-1610