

# Integrando los métodos geocronológicos y modelamiento probabilístico para el análisis de las amenazas volcánicas: el caso del **volcán Galeras**

Ruby Alicia Criollo<sup>1</sup>, Gustavo Córdoba Guerrero<sup>2</sup>, Diana Rodríguez<sup>1</sup>, Alejandra Guerrero<sup>1</sup>, Antonio Costa<sup>2</sup> y Jean-Claude Thoure<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Nariño, Colombia- gcordovaguerrero@gmail.com

<sup>2</sup> Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), Sezione di Bologna, Italy.

<sup>3</sup> Université Clermont- Auvergne, Laboratoire Magmas et Volcans, CNRS, OPGC, IRD, 6 avenue Blaise Pascal, Campus les Cézeaux, 63178 Aubière, France

**Palabras clave:** volcán Galeras, Severidad Ponderada, modelamiento.

## INTRODUCCIÓN

La generación de mapas de amenaza volcánica involucra varios peligros específicos en un solo mapa que los compila en un intento de proporcionar la probabilidad de futuros eventos volcánicos que afecten a lugares, propiedades y personas. Por lo general, los mapas de peligro volcánico se basan en registros geológicos o una combinación de estos últimos con modelos computacionales, pero ambos tienen incertidumbres que deben considerarse. La evaluación probabilística de peligros es considerada como el enfoque más confiable para hacer frente a las incertidumbres inherentes involucradas que permite tener en cuenta el carácter aleatorio de este fenómeno (Sparks et al, 2013). La cantidad de información resultante de un análisis probabilístico de la amenaza se puede compilar de varias maneras; entre ellas, la que involucra la vulnerabilidad de los elementos expuestos, la cual, combinándola con la amenaza probabilista, resulta en mapas de riesgo. Sin embargo, los mapas de amenaza que compilan todas las amenazas volcánicas han venido siendo la herramienta más usada para la toma de decisiones. A menudo, los registros geológicos no pueden proporcionar un número estadísticamente significativo de datos para permitir un análisis probabilístico completo, por lo que se utilizan herramientas estadísticas y de modelado computacional para complementar los registros geológicos, teniendo en cuenta las incertidumbres involucradas.

## METODOLOGÍA

En este trabajo aplicamos para el volcán Galeras un método práctico para abordar el problema de la

evaluación probabilística de peligros volcánicos (PVHA) mediante la compilación de todos los peligros probabilísticos en un solo mapa. Primero, para cada uno de los peligros volcánicos (onda de choque, caídas piroclásticas, proyectiles balísticos, lahares y corrientes de densidad piroclástica o PDCs), realizamos un análisis probabilístico centrado en la probabilidad condicionada a la ocurrencia de cada fenómeno específico, describiendo distribuciones probabilísticas para cada uno dentro de rangos de la magnitud máxima y mínima de cada amenaza. El análisis se realizó por medio de modelamiento, cuyos rangos y condiciones iniciales son dados por la geología y la historia del volcán. Dentro de cada rango, se establece un muestreo estadísticamente significativo de combinaciones de condiciones iniciales, usando la técnica del Muestreo Hipercúbico Latino Ortogonal (OLHS) que hace computacionalmente factible el modelamiento por el reducido número de muestras (del orden de cientos de muestras en lugar de miles como con Monte Carlo). Los resultados del modelamiento se traducen en información raster a ser tratada por un sistema de información geográfica. En este caso usamos el programa de código abierto Grass-Gis.

Todos los eventos fueron modelados sobre un DEM de 3 metros, resultando en una escala menor a 1:5.000. Cada evento amenazante se modeló con un programa en particular. Las corrientes piroclásticas de densidad se modelaron en dos partes y adaptando las ideas de Ogburn y Calder (2017); para lo cual modelamos la parte basal del flujo con Titan2D y la nube acompañante con las líneas de energía; tomando como condiciones iniciales los trabajos previos de Calvache (1990), Hurtado y Cortés (1997). Para

modelar proyectiles balísticos desarrollamos nuestro propio código, teniendo así en cuenta el cambio de densidad de la atmósfera con la altura; las condiciones iniciales necesarias se tomaron de los datos proporcionados por Hurtado y Cortés (1997), Servicio geológico Colombiano (2015). Los piroclastos de caída se modelaron con el programa HAZMAP (Macedonio et al, 2005), tomando como condiciones iniciales la información de Hurtado y Cortés (1997), sgc(2015) e información directamente proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano relacionada con registros geológicos del ciclo eruptivo 2008-2018. La onda de choque se modeló tridimensionalmente para tener en cuenta la refracción y reflexión de la onda con la orografía usando el programa OpenFoam; las condiciones iniciales se tomaron a partir de la energía necesaria para tener afectaciones similares a las del ciclo eruptivo de 1925-1927. Los lahares se modelaron usando el programa Titan2F (Córdoba et al, 2018) tomando como condiciones iniciales datos de precipitación y volúmenes de caídas piroclásticas. Seguidamente se desarrollaron scripts para Octave/Matlab que permitieron estimar la probabilidad bayesiana de que se excedan límites de interés para el análisis del riesgo, como por ejemplo presiones dinámicas capaces de afectar personas, estructuras en muros confinados o no, estructuras sismoresistentes, etc.

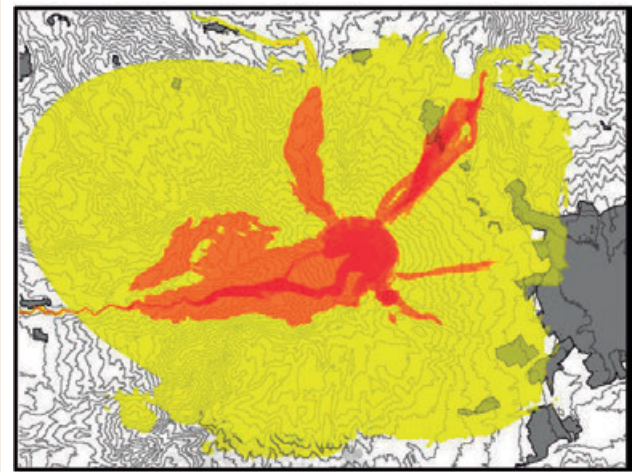
A continuación, se adapta el Método de Severidades Ponderadas (WSM) utilizado en Hurtado y Cortés (1997). Esto se hizo eliminando el supuesto de eventos mutuamente excluyentes para así tener en cuenta los peligros para los cuales faltan registros geológicos, como las ondas de choque. Además, reclasificamos los niveles de severidad para poder tener en cuenta el daño esperado a diferentes niveles de intensidad para cada uno de los peligros. Luego, en cada píxel del modelo de elevación digital, aplicamos el WSM para obtener el nivel de severidad ponderado (WSL) de cada peligro. Siguiendo a Hurtado y Cortés (1997), si  $WSL < 10$ , el nivel de peligro es bajo; si  $10 < WSL < 20$  el peligro medio y si  $WSL > 20$ , el peligro es alto. Como resultado, se presenta un mapa de peligros probabiñíficos para el volcán Galeras que incluye todas sus amenazas volcánicas individuales, incluyendo ondas de choque, proyectiles balísticos, corrientes de densidad piroclástica, caídas

piroclásticas y lahares. Las anteriores operaciones sobre la información en formato raster se realiza usando las capacidades de operar matemáticamente entre mapas que tiene Grass-Gis.

## RESULTADOS

A excepción de los PDCs, para todas las amenazas volcánicas se generaron 128 combinaciones OLHS que resulta en un error de muestreo  $\leq \lfloor 10 \rfloor^{-4}$ . Con dichas combinaciones como condiciones iniciales, se procedió a modelar, para luego proceder a estimar la probabilidad de excedencia de que el punto de la grilla computacional resulte afectado para magnitudes predefinidas de cada amenaza.

En el caso de PDCs, hay tres incertidumbres principales en su modelado: las coordenadas X e Y, representadas por la distancia radial al cráter, el volumen y la altura de colapso. La combinación de estas tres condiciones se obtiene a través del muestreo OLHS. Los lugares aleatorios de arranque se muestran en la Figura 1 en la cual se miran un anillo y un círculo central. En total se tienen para flujos piroclásticos 640 combinaciones.



► Fig. 1 - Lugares aleatorios de inicio de PDCs. El anillo contiene información de 512 combinaciones OLHS de localización, volumen y altura de colapso. El círculo interior contiene 128 combinaciones

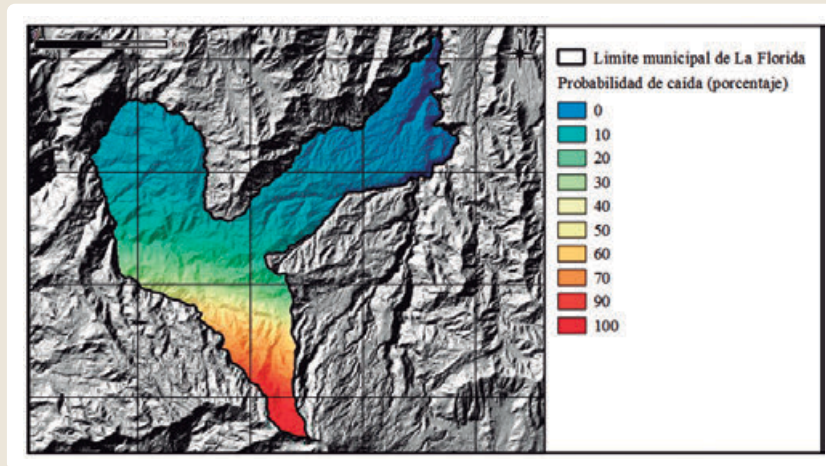
Para la nube acompañante se comparó el coeficiente H/L que resulta de dividir la altura de colapso que corresponde a cada punto de arranque con la distancia

de los puntos de la grilla del DEM. Este valor se compara con los valores dados por Ogburn y Calder (2017), permitiendo conocer si la nube alcanza o no el punto de la grilla.

Para la parte basal, en cada lugar, con sus respectivos valores de volumen y altura de colapso, se realiza el modelamiento con Titan2D, cuyos resultados

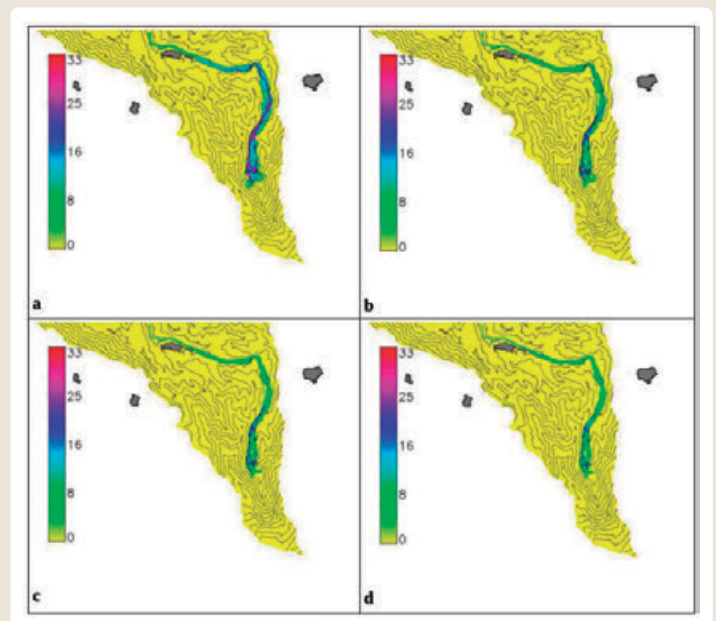
permiten un análisis bayesiano de la probabilidad de que el flujo alcance cualquier punto de la grilla computacional.

La **Figura 2** muestra el resultado de la envolvente de probabilidades de que un lugar cualquiera dentro de la grilla analizada sea alcanzado por PDCs.



► **Fig. 2** – Probabilidad mayor que el 0.01% de que Corrientes de Densidad Piroclástica (PDCs) alcancen el área de influencia del volcán Galerías. La línea roja corresponde a la zona de amenaza alta determinada por el Mapa de Amenazas del Servicio Geológico Colombiano (2015)

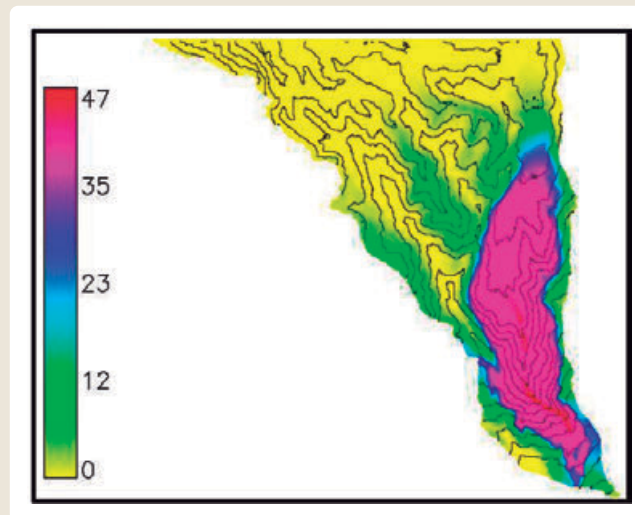
En el caso de que la fuente sea única, como el caso de onda de choque, la probabilidad es de tipo frecuencial. La figura 3 muestra la probabilidad de excedencia de 1 kPa, suficiente para romper vidrios y ventanales relativamente pequeños. Se observa como el efecto de reflexiones y refracciones incrementan la presión dinámica, pasando de una dispersión radial a una dispersión mucho más compleja, modulada por la orografía del volcán. Se puede entender con estos resultados el mecanismo mediante el cual la onda de choque ha afectado en repetidas ocasiones a la ciudad de Pasto, rompiendo sus vidrios y derribando personas hacia el lado sur-occidental, hacia donde se dirige el anfiteatro del volcán.



► **Fig. 3** – Probabilidad de excedencia del impacto de una presión dinámica 1 kPa. Nótese la influencia de la orografía del sector, donde reflexiones y refracciones de la onda afectan su propagación.

Finalmente, una vez obtenidos los resultados del análisis probabilista de cada una de las amenazas, y aplicando la técnica de las Severidades Ponderadas (Hurtado y Cortés, 1997) se compilaron en un solo

mapa que muestra tres niveles de Severidad Ponderada (ver Figura 4). En rojo, severidad Alta: en Anaranjado, la severidad media: y en amarillo la severidad Baja.



► Fig. 4 - Mapa de severidades ponderadas a una escala 1:5.000 teniendo en cuenta todas las amenazas del volcán Galeras. En Rojo nivel de severidad ponderada Alto, en Anaranjado nivel medio y en Amarillo nivel Bajo.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se consideraron todos los eventos amenazantes del volcán Galeras, tanto los que han dejado registros geológicos, como flujos piroclásticos, caídas piroclásticas, lahares, y aquellos que, o no dejan registros geológicos, o cuyo encuentro es muy difícil, como la onda de choque y la nube acompañante, oleadas piroclásticas. Por medio del modelamiento numérico fue posible lograr un muestreo estadísticamente significativo que complementó la información geocronológica, haciendo posible obtener un mapa de severidades ponderadas probabilística.

La base topográfica sobre la cual se trabajó, permitió una escala 1:5.000, que en conjunto con las probabilidades obtenidas para cada evento amenazante muestra un avance en el conocimiento de las amenazas del volcán Galeras.

Si bien un mapa de severidades ponderadas no permite una evaluación probabilista del riesgo en términos de costo, si lo permitiría en términos cualitativos; así en caso que se prefiera usar los mapas de amenaza como herramienta en la toma de decisiones, es posible tener en cuenta todas las amenazas con un bajo error en el muestreo.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo se realizó gracias al Convenio 2017000277 Universidad de Nariño-Municipio de la Florida, y a la Vicerrectoría de Investigaciones e Iteración Social de la Universidad de Nariño, Colombia, investigación 1889 de 2019.

## REFERENCIAS

- ▶ Córdoba, G. A., Sheridan, M. F., & Pitman, B. (2018). Titan2F code for lahar hazard assessment: derivation, validation and verification. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 611-631.
- ▶ Hurtado, A. D. and Cortés, G. P. J. (1997). Third version of the hazard map of Galeras Volcano, Colombia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 77, 89-100.
- ▶ Ogburn, S. and Calder, E. (2017). The relative effectiveness of empirical and physical models for simulating the dense undercurrent of pyroclastic flows under different emplacement conditions. *Frontiers in Earth Science* 5, 1-23. doi:10.3389/feart.2017.00083
- ▶ sgc (2015). Actualización Del Mapa De Amenaza Volcánica Del Volcán Galeras – Colombia. Tech. rep., Servicio Geológico Colombiano, Pasto, Colombia.
- ▶ Sparks, R., Aspinall, W., Crosweller, H., and Hincks, T. (2013). Risk and uncertainty assessment of volcanic hazards. In *Risk and Uncertainty Assessment for Natural Hazards*, eds. J. Rougier, R. Sparks, and L. J. Hill (Bristol: University of Bristol). 364-397. doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139047562.01>