

# Mapas de amenaza por caída de ceniza y proyectiles balísticos, **volcán de Pacaya, Guatemala**

Dulce González<sup>1</sup>, Rüdiger Escobar-Wolf<sup>2</sup> y Gustavo Chigna<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Mariano Gálvez, Guatemala - dulce.gonzalez@umg.edu.gt

<sup>2</sup> Ingeniería y Ciencias Geológicas y de Minas, Universidad Tecnológica de Michigan, Estados Unidos

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Guatemala

**Palabras clave:** Mapas de amenaza, caída de ceniza, balísticos.

La actividad volcánica alrededor del mundo es muy variada y compleja. En Guatemala existen alrededor de 43 estructuras que son consideradas como volcanes y que se alinean de oeste a este del país debido a la zona de subducción. A la actualidad la clasificación de volcanes publicada por INSIVUMEH en el ranking de Peligrosidad Volcánica define tres volcanes con actividad diaria significativa: Pacaya, Fuego y Santiaguito, las cuales generan productos volcánicos

que afectan poblaciones, infraestructuras, medios de vida y vías aéreas en todo el país (Roca et al., 2021).

Debido a su cercanía con la ciudad de Guatemala y los productos volcánicos que genera, el volcán de Pacaya es uno de los volcanes más peligrosos, catalogado como un volcán con un VEI 3, su actividad varía entre efusiva de tipo estromboliana y explosiva con probabilidades de desarrollar actividad subpliniana como lo menciona Kitamura y Matías (1995).

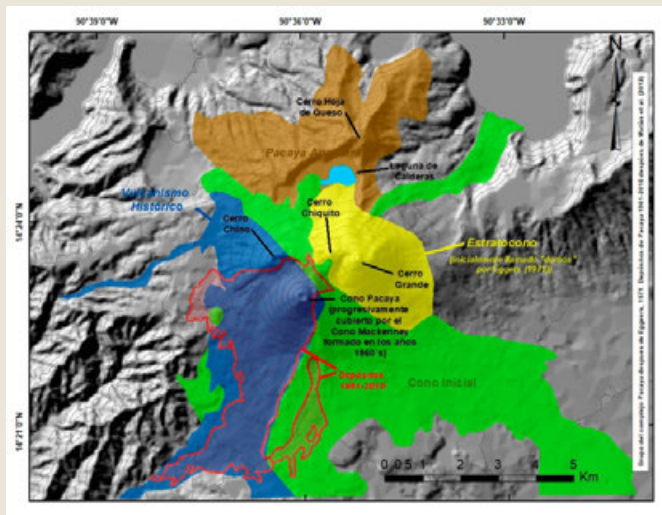


Fig. 1



Fig. 2

- ▶ Fig. 1 – Basado en “A 50 yr eruption of a basaltic composite cone: Pacaya, Guatemala”, muestra la actividad histórica del volcán de Pacaya en orden cronológico (Rose et al., 2013).
- ▶ Fig. 2 – Impactos generados durante el evento eruptivo del 27 de mayo del año 2010 por Gustavo Chigna A) Afeción por caída de ceniza en el Aeropuerto La Aurora ubicado en la ciudad de Guatemala. B y C) Daños a la infraestructura por impacto de balísticos en las cercanías del complejo volcánico. (Wardman & GNS Science (N.Z), 2012).

Las principales amenazas para las comunidades cercanas son: flujos de lava, proyectiles balísticos y caída de ceniza; de estas, la caída de ceniza repercute directamente sobre la ciudad de Guatemala (Fig. 2A) y llega a generar depósitos de hasta 1 m en las áreas más cercanas, mientras que, el impacto de balísticos afecta principalmente las poblaciones cercanas (Fig. 2B y 2C), como se evidenció durante el evento eruptivo del año 2010 (INSIVUMEH, 2010), en donde las comunidades fueron afectadas directamente por los balísticos los cuales generaron incendios tanto de viviendas como de medios de sustento (Wardman & GNS Science (N.Z), 2012).

A pesar de la existencia de los mapas de amenaza generados por Norman Banks (1985) y JICA (2003), estos lamentablemente no han contado con los criterios necesarios para mostrar la verdadera amenaza que estos fenómenos representan ya que se basan únicamente en mapeo geológico, por lo que se ha hecho necesario generar mapas de amenaza actualizados que proyecten la probabilidad de ocurrencia de las amenazas, identificando las zonas de mayor y menor impacto, insumos que pueden ser útiles para la población y las autoridades.

Para la definición de las áreas de impacto asociadas a caída de ceniza y proyectiles balísticos se utilizó una metodología mixta que incluye tres componentes: la recopilación inicial de información (recopilación bibliográfica y de campo), el análisis estadístico de datos para seleccionar las variables de entrada para los modelos de procesos volcánicos (análisis de sensores remotos y análisis estadístico de las posibles variables de entrada), y finalmente la modelación de procesos volcánicos usando modelos numéricos que proyectan la probabilidad de ocurrencia de las amenazas.

Durante la primera fase se procedió a la recolección de datos por medio de observaciones in situ. Para el caso de los proyectiles balísticos se realizó un recorrido en la zona proximal de la fuente eruptiva actual (cono Mackenney), los balísticos se caracterizaron por ser de tipo basáltico, con una densidad promedio de 2 940 kg/m<sup>3</sup>, variando de tamaño entre 1,5 metros a bloques menores de 25 centímetros, con formas fusiformes (Fig. 3A y 3B) y por lo general están ubicados en un perímetro no mayor a 2 kilómetros en

los alrededores del volcán de Pacaya y 5 kilómetros según la recopilación bibliográfica.

Para el muestreo de ceniza se ubicaron las columnas descritas por Kitamura y Matías (1995) en donde previamente fueron realizadas una serie de columnas tefroestratigráficas (Kitamura & Matías, 1995), recolectando muestras de los distintos eventos en los puntos 4 y 5 señalados con color rojo en la Fig. 3C; posteriormente se realizó un ensayo granulométrico



► Fig. 3 - A) y B) Muestras de proyectiles balísticos recolectados en las cercanías del área que se utilizaron para la descripción reológica y las características observadas en campo. C) Correspondencia y ubicación de las columnas tefroestratigráficas definidas por Kitamura y Matías (1995), en rojo se observan las columnas utilizadas para los ensayos granulométricos.

que consistió en diferenciar el tamaño de partículas distinguiendo entre lapilli, ceniza gruesa y ceniza fina (Fisher, 1961).

Durante la fase estadística se tabuló la información bibliográfica recabada, enfocada en priorizar los valores máximos y mínimos de la actividad explosiva del volcán de Pacaya, tales como alturas de columnas, desplazamiento de las columnas de ceniza, espesores registrados y dispersión de proyectiles balísticos, todos estos datos estandarizados según las variables de entrada que se utilizaron posteriormente para los modelos computacionales.

El análisis estadístico de las direcciones y velocidades preferenciales de viento se realizó en base a los modelos globales extraídos de la NOAA (NOAA Satellite and Information Service, 2018), utilizando tres parámetros principales: dirección ( $\Phi$ ), velocidad (m/s) y altura (km). Con estos datos se realizó una media de 10 años (2009-2019) y los resultados de la variabilidad son descritos según los meses (enero a diciembre) y la altura de los perfiles de viento que además fueron variados de 4,500 msnm a 15,000 msnm, correspondiente a datos históricos de generación de altura de columna eruptivas observada, reportada y medida y un valor de actividad superior al registrado según el Índice de Explosividad Volcánica.

En el caso de la determinación de la altura de la columna de ceniza se tomaron en cuenta aquellas columnas del registro histórico, tomando la base de datos de instituciones como el Smithsonian e INSIVUMEH y registros medidos con análisis satelital producidos por la NOAA.

Para el análisis del volumen de caída de ceniza, se utilizó como base el trabajo de Matías (2009), donde se menciona los volúmenes correspondientes a distintas caídas de ceniza histórica reconocidas como parte del trabajo iniciado por Kitamura y Matías (1995).

La modelación se dividió en tres fases, la primera en la utilización de modelos numéricos basados en los modelos de Mastin (2001) y Bonadonna et al. (2005), la segunda contrarrestando los datos obtenidos con las simulaciones y la validación a través de eventos registrados por Rose et al. (2013) e INSIVUMEH y finalmente la generación de escenarios de amenaza

volcánica tanto para caída de ceniza como para caída de balísticos.

Para la caída de ceniza se utilizó la base del modelo TEPHRA, este es un algoritmo de computación propuesto por Bonadonna et al., (2005), caracterizado por ser un modelo que implementa la difusión-advención que determina el comportamiento de la caída de ceniza, integrando parámetros físicos de las partículas y distribución del viento que es fundamental para la distribución y sedimentación (deposito) de la ceniza a través de la ecuación de Armienti et al. (1988) y Suzuki (1983).

¡En el caso de la caída de balísticos se implementó el programa de cómputo EJECT!, este es un código desarrollado por Mastin (2001) con el propósito de calcular las posibles trayectorias de los proyectiles balísticos y su probabilidad del alcance. Toma en consideración parámetros como la fuerza con que es expulsado el proyectil, la velocidad inicial y la velocidad de impacto, la fuerza de arrastre del viento, una trayectoria parabólica, el número de Reynolds y la topografía del área de estudio (Mastin, 2001).

Ambos modelos (¡TEPHRA y EJECT!), fueron trasladados a un código para ser utilizados en la plataforma abierta Octave por Rüdiger Escobar-Wolf de la Universidad Tecnológica de Michigan, que además facilita la generación de archivos de salida de fácil lectura en plataformas de Sistema de Información Geográfica (SIG).

En total se realizó alrededor de 480 simulaciones para caída de ceniza, combinando los parámetros desde el mínimo reportado hasta los valores teóricos establecidos para un VEI de 3, los parámetros utilizados son: altura, volumen de la ceniza, distribución del tamaño del grano y los perfiles de viento obtenidos para cada uno de los 12 meses del año (Fig. 4A).

Mientras que, para los balísticos se contabilizó un total de 160 simulaciones definidas por variables como la altura inicial, la densidad del proyectil, el tamaño del balístico y la velocidad máxima teórica (250 m/s) de lanzamiento del balístico (Fig. 4B), estas variables fueron aplicadas en cuatro puntos de emisión histórica: el cráter del cono Mackenney, la zona de colapso de la erupción del año 2010, el Cerro Chino y



el punto de migración de los flujos de lava de Los Pocitos generado en el año 2010.

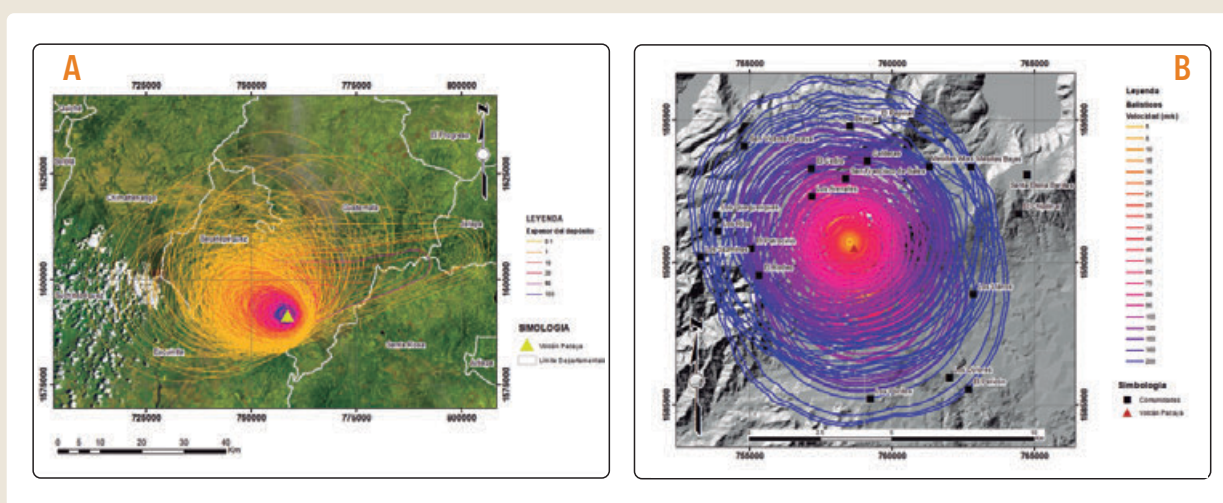
La validación de los datos obtenidos de las simulaciones se realizó contrarrestando la información recabada por Matías et al. (2012) donde se define el espesor de las caídas de ceniza y con imágenes satelitales donde se puede observar el depósito generado por la caída de ceniza, los balísticos se contrarrestaron con la base de datos de INSIVUMEH, donde se establece un mapeo de balísticos de diferentes erupciones.

La generación de los mapas se basó en la Metodologías para el análisis y manejo de los riesgos naturales (MET-ALARN) publicada en Nicaragua en el año 2005, la cual se basa en la utilización de matrices de escenario de amenaza volcánica, estas matrices incluyen la tasa de retorno de los eventos según el Índice de Explosividad Volcánica y la probabilidad de ocurrencia de la amenaza, en este caso se utilizaron las probabilidades obtenida de la proyección de las simulaciones (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales & Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, 2005).

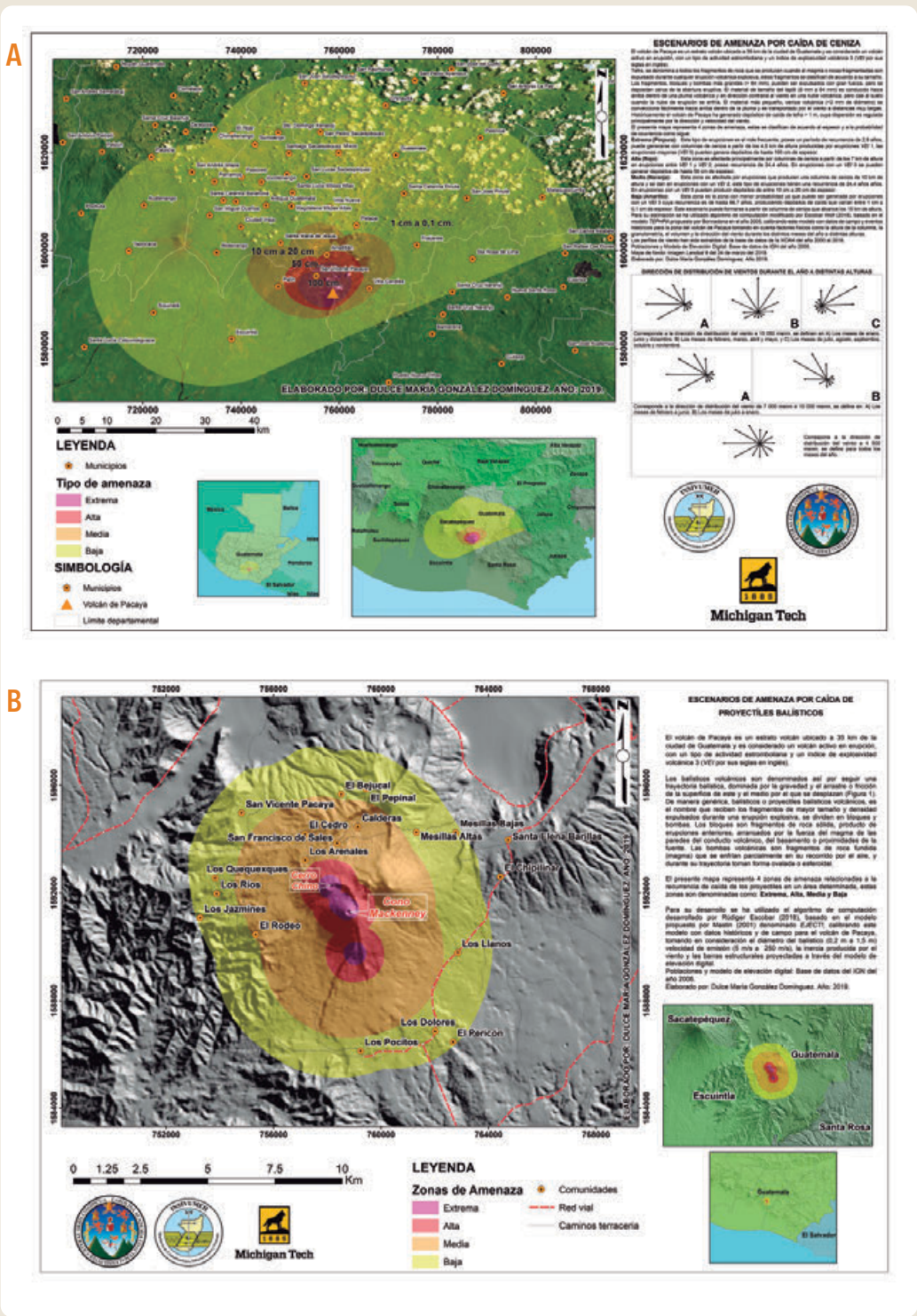
Los escenarios para caída de ceniza incluyen el espesor, la distancia, la probabilidad de ocurrencia de un depósito y el período de recurrencia entre

erupciones, estos escenarios son: Amenaza extrema, con depósitos de hasta 100 cm con un área de hasta 7 kilómetros y un período de recurrencia de 2,8 años; amenaza alta, con depósito de hasta 50 cm, dispersas en un área de entre 7 y 10 kilómetros y un periodo de recurrencia de 24,4 años; amenaza media, con depósitos de entre 10 y 20 centímetros de espesor, en un área de entre 10 y 20 kilómetros y un período de recurrencia de 24,4 años y finalmente la amenaza baja, con espesores de 1 a 0,1 cm en un área de hasta 60 kilómetros y período de recurrencia de hasta 66,7 años (Fig. 5A).

Los escenarios para la caída de balísticos se han diferenciado por tres factores, la distancia máxima, la recurrencia de caída de un proyectil y el período de recurrencia entre las erupciones, estos escenarios son: Amenaza extrema, ubicada en un área no mayor a 500 metros de los centros eruptivos con un período de recurrencia de hasta 2.8 años; amenaza alta, ubicada en un área de entre 0.5 a 1.2 kilómetros de los centros eruptivos con un período de recurrencia de hasta 24.4 años; amenaza media, ubicada en un área de entre 1.2 y 3.5 kilómetros con un período de recurrencia de hasta 24.4 años y finalmente la amenaza baja que se proyecta en un área de impacto de entre 3.5 a 5.4 kilómetros con un período de recurrencia de hasta 66.7 años (Fig. 5B).



► Fig. 4 – Resultado del total de las simulaciones obtenida combinando los datos de campo y datos teóricas para expresar la probabilidad mínima y máxima de impacto por: A) Caída de ceniza según el espesor de la caída que va de 0.1 mm (color amarillo) a 100 cm (color azul) y B) Caída de balísticos según la velocidad de emisión del balístico que va de 5 m/s (color amarillo) a 200 m/s (color azul).



► Fig. 5 – A) Se observa la zona de probabilidad de amenaza por caída de ceniza dividida según la probabilidad de la amenaza en extrema (morada), alta (roja), media (naranja) y baja (amarilla). B) en la parte inferior se observa la zona de probabilidad de amenaza por caída de balísticos dividida según el tipo de amenaza en extrema (morada), alta (roja), media (naranja) y baja (amarilla).

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), por abrir las puertas de la institución y brindar acceso a muchos de los datos bases para la construcción de esta investigación.

A Rüdiger Escobar, por ser facilitador en el proceso de desarrollo de la investigación, por contribuir con sus conocimientos en cada uno de los pasos para la formulación y el logro de los resultados.

A Gustavo Chigna, quien ha sido un maestro, un guía y un amigo, quien a través de su enseñanza a formado a muchos de los que hoy en día tratamos de contribuir en la Vulcanología del país.

## REFERENCIAS

- ▶ Bardintzeff, J.-M., & Deniel, C. (1992). Magmatic evolution of Pacaya and Cerro Chiquito volcanological complex, Guatemala. *Bulletin of Volcanology*, 54(4), 267–283. <https://doi.org/10.1007/BF00301482>
- ▶ Bonadonna, C. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 110(B3), B03203. <https://doi.org/10.1029/2003JB002896>
- ▶ Eggeres, A. (1969). Hoja geológica Amatitlán (2059 II G) [Geológico]. Dartmouth College de New Hampshire e Instituto Geográfico Nacional. Guatemala: Ministerio de Comunicaciones y Obras Públicas.
- ▶ Fisher, R. V. (1961). PROPOSED CLASSIFICATION OF VOLCANIC CLASTIC SEDIMENTS AND ROCKS. *Geological Society of America Bulletin*, 72(9), 1409. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1961\)72\[1409:PCOVSA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1409:PCOVSA]2.0.CO;2)
- ▶ INSIVUMEH. (2010). Reporte de Erupción Volcán de Pacaya (1402-11). Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (Recuperado en 2019).
- ▶ INSIVUMEH. (2019). Volcán Pacaya. Volcanes de Guatemala. [www.historico.insivumeh.gob.gt](http://www.historico.insivumeh.gob.gt) (Recuperado en 2019).
- ▶ Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales, & Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. (2005). Erupciones volcánicas: Mapas de amenazas, recomendaciones técnicas para su elaboración (p. 48) [Desastres naturales. prevención, volcanes, Nicaragua]. [http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/e65efa26c05e16ebfb6017bd587d1046\\_0.pdf](http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/e65efa26c05e16ebfb6017bd587d1046_0.pdf).
- ▶ Kitamura, S., & Matías, O. (1995). Tephra stratigraphic approach to the eruptive history of Pacaya volcano, Guatemala. (Science Reports Seventh Series; Geography, pp. 1–41). Tohoku University.
- ▶ Mastin, L. G. (2001). Simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions (Núm. 01–45; 1.2, p. 18). U.S. Geological Survey, Cascades Volcano Observatory. [https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/pdf/of2001-0045\\_v1-2.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2001/0045/pdf/of2001-0045_v1-2.pdf).
- ▶ Matías Gómez, R. O., Rose, W. I., Palma, J. L., & Escobar-Wolf, R. (2012). Notes on a map of the 1961–2010 eruptions of Volcán de Pacaya, Guatemala [Map].

- ▶ NOAA Satellite and Information Service. (2018). Current Volcanic Ash Advisories, Washington VAAC. National Environmental Satellite, Data and Information Service (NEDIS). <https://www.ssd.noaa.gov/VAAC/messages.html>
- ▶ Roca, A., Mérida Boogher, E. R., Chun Quinillo, C. M. F., González Domínguez, D. M. E., Chigna Marroquin, G. A., Juárez Cacao, F. J., & Argueta Ordoñez, P. D. (2021). Volcano observatories and monitoring activities in Guatemala. *Volcanica*, 4(S1), 203–222. <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.203222>.
- ▶ Rose, W. I., Palma, J. L., Escobar Wolf, R., & Matías Gomez, R. O. (2013). A 50 yr eruption of a basaltic composite cone: Pacaya, Guatemala. En W. I. Rose, J. L. Palma, H. D. Granados, & N. Varley, *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2013.2498\(01\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(01)).
- ▶ Smithsonian Institution. (2013). Pacaya [Science]. Global Volcanism Program. <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=342110> (Recuperado en 2019).
- ▶ Wardman, J. & GNS Science (N.Z.). (2012). Impact assessment of the May 2010 eruption of Pacaya volcano, Guatemala. GNS Science.