

Observatorios vulcanológicos y actividades de monitoreo en Guatemala

Amilcar E. Roca Palma*, Edgar R. Mérida Boogher, Carla M. F. Chun Quinillo,
Dulce M. E. González Dominguez, Gustavo A. Chigna Marroquin,
Francisco J. Juárez Cacao, Peter D. Argueta Ordoñez

*Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH),
7a Av. 14-57, Zona13, Ciudad de Guatemala, Guatemala.*

RESUMEN

El ambiente tectónico y volcánico de Guatemala es extenso y complejo. Tres grandes placas tectónicas, que interactúan constantemente entre sí, y un arco volcánico, que se extiende de este a oeste en la parte sur del país, exigen especial atención en términos de monitoreo y estudios científicos. El Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) es el instituto encargado de ejecutar estas acciones a nivel nacional y civil. En los últimos años, INSIVUMEH ha formado un equipo de vulcanología conformado por personal multidisciplinario que realiza las principales actividades de seguimiento e investigación vulcanológica. Estas actividades incluyen: análisis de señales sísmicas y acústicas, evaluación y análisis de peligros volcánicos, instalación y mantenimiento de equipos de monitoreo, y socialización y difusión del conocimiento volcánico. De todas las estructuras volcánicas de Guatemala, tres volcanes (Fuego, Pacaya y Santiaguito) están en constante erupción y requieren todos los recursos disponibles (económicos y humanos). Estos volcanes presentan una amplia gama de peligros volcánicos (en cuanto a tipo y magnitud), haciendo que el monitoreo diario sea un gran desafío. Uno de los mayores logros del equipo de vulcanología ha sido el desarrollo reciente de un Ranking de Peligrosidad Relativa de los Volcanes de Guatemala, tomando en cuenta diferentes parámetros que permitan una mejor planificación en el futuro, tanto en el monitoreo como en la investigación.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.203222> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

El país tiene una geología diversa como resultado de una interacción compleja entre tres placas tectónicas principales (de norte a sur): Norteamericana, del Caribe y de Cocos. Una de las expresiones más distintivas asociada con este complejo escenario tectónico es la ocurrencia de vulcanismo superficial.

Los volcanes guatemaltecos están ubicados en el segmento más al norte del Arco Volcánico Centroamericano (AVCA), que es el resultado de la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa del Caribe [Carr et al. 2003]. El AVCA se puede subdividir en dos áreas: el frente volcánico y las áreas detrás del frente (o BVF, por sus siglas en inglés). El frente volcánico en Guatemala se divide en los segmentos occidental, central y oriental [Stoiber y Carr 1973]. La mayoría de los centros volcánicos en el frente volcánico son grandes conos compuestos y estratovolcanes construidos a partir de basaltos calco-alcalinos, andesitas y dacitas [Carr et al. 1979]. La mayor concentración de vulcanismo BVF en Centroamérica se encuentra en el sureste de Guatemala [Walker et al. 1995]. Esto se expresa a través de dos campos de conos principales: Graben de Ipala y Cuilapa-Barberena [Walker 1981]. En este sector exis-

ten, también, calderas relativamente pequeñas, conos compuestos y volcanes en escudo [Walker et al. 1995].

Se han realizado diferentes intentos de enumerar y clasificar los volcanes guatemaltecos, desde 324 centros eruptivos cuaternarios según Bohnenberger [1969], a 39 volcanes en el Diccionario Geográfico oficial [Gall y Nacional 1976], 36 en el catálogo de volcanes del Programa de Vulcanismo Global del Smithsonian (GVP, por sus siglas en inglés), y una estimación reciente de 43 volcanes enumerados en 2019 por el grupo de vulcanología del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH). De estos 43, un total de 25 volcanes se consideran activos o potencialmente activos y actualmente son objeto de un Ranking de Peligrosidad Relativa implementado por el grupo de Vulcanología de INSIVUMEH (Figura 1 y Tabla 1). Esta clasificación sigue la metodología propuesta por Ewert [2007] para el Sistema de clasificación de los peligros relativos de los volcanes de EE. UU. Actualmente, los esfuerzos del INSIVUMEH están enfocados completamente en los volcanes que representan el mayor peligro (grupo de peligrosidad muy alta), pero a corto plazo otros volcanes que también representan un peligro (grupo de peligrosidad alta y moderada) se incluirán en el monitoreo diario.

Durante épocas históricas, y según el INSIVUMEH y el GVP, sólo siete de los volcanes guatemaltecos

*Autor de correspondencia: aeroca@insivumeh.gob.gt

Tabla 1: Cada volcán tiene una entrada en el sitio web del Programa de Vulcanismo Global del Smithsonian, con información sobre su geología, historia eruptiva, informes de actividad y más (cuando está disponible), que se puede encontrar en <https://volcano.si.edu/volcano.cfm?vn=>, seguido del Número GVP exclusivo, como se muestra en la tabla.

Posición en el ranking	Número GVP	Volcán	Grupo de peligrosidad	Última actividad
1	342030	Santa Maria/Santiaguito		2021 EC
2	342090	Fuego	Muy alta	2021 EC
3	342110	Pacaya		2021 EC
4	341130	Tacaná		1986 EC
5	342040	Cerro Quemado		1818 EC
6	342080	Acatenango/Yepocapa	Alta	1972 EC
7	342060	Atitlán		1853 EC
8	342070	Tolimán		Desconocida
9	342120	Agua		Desconocida
10	342100	Tecuamburro		960 AEC
11	342141	Tahual	Media	Desconocida
12	342180	Ixtepeque		Desconocida
13	342121	Jumaytepeque		Desconocida
14	342020	Tajumulco		Desconocida
15	342800	Zunil		Desconocida
16	342809	Siete Orejas		Desconocida
17	342160	Suchitán		Desconocida
18	342130	Moyuta	Baja	Desconocida
19	342190	Ipala+Monte Rico		Desconocida
20	342140	Amayo-Las Flores		Desconocida
21	342170	Chingo		Desconocida
22	342111	Cuilapa Barberena		Desconocida
23	342150	Grupo Cerro Santiago-Jutiapa		Desconocida
24	342200	Campo Volcánico Chiquimula	Muy baja	Desconocida
25	342210	Campo Volcánico Quezaltepeque		Desconocida

cio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) visitó Guatemala, donde se consolidó la creación de la sección de vulcanología en INSIVUMEH, con 12 personas trabajando en deformación, sismología volcánica y geología. El instrumental para el monitoreo de deformación y las estaciones sísmicas fueron donados por el USGS, e incluyó la instalación de una estación sísmica de período corto en cada uno de los volcanes Fuego, Pacaya y Santiaguito. El mismo grupo de instituciones llevó a cabo dos cursos más de vulcanología en Nicaragua (1989) y Guatemala (1990). Como resultado importante de esta colaboración, en 1990 CEPREDENAC hizo posible la construcción del primer observatorio volcánico en Guatemala, con el propósito de monitorear la actividad volcánica del volcán Santiaguito. Estas instalaciones fueron construidas en la Finca El Faro, ubicada a 6 km del complejo volcánico. Un

segundo observatorio fue construido por INSIVUMEH como consecuencia de un importante evento eruptivo en Fuego, en 1999. Este se ubicó a 9 km del cráter de Fuego, en una comunidad rural llamada Panimaché. Desde el primer día de operaciones, ambos observatorios han sido apoyados por INSIVUMEH. En los años siguientes, los planes de cooperación continua con instituciones internacionales, como el USGS, permitieron fortalecer y mejorar la red de monitoreo y las capacidades de monitoreo volcánico. El grupo de Vulcanología está monitoreando actualmente la actividad volcánica en estos tres volcanes en erupción continua (ver por ejemplo [Figura 2](#)).

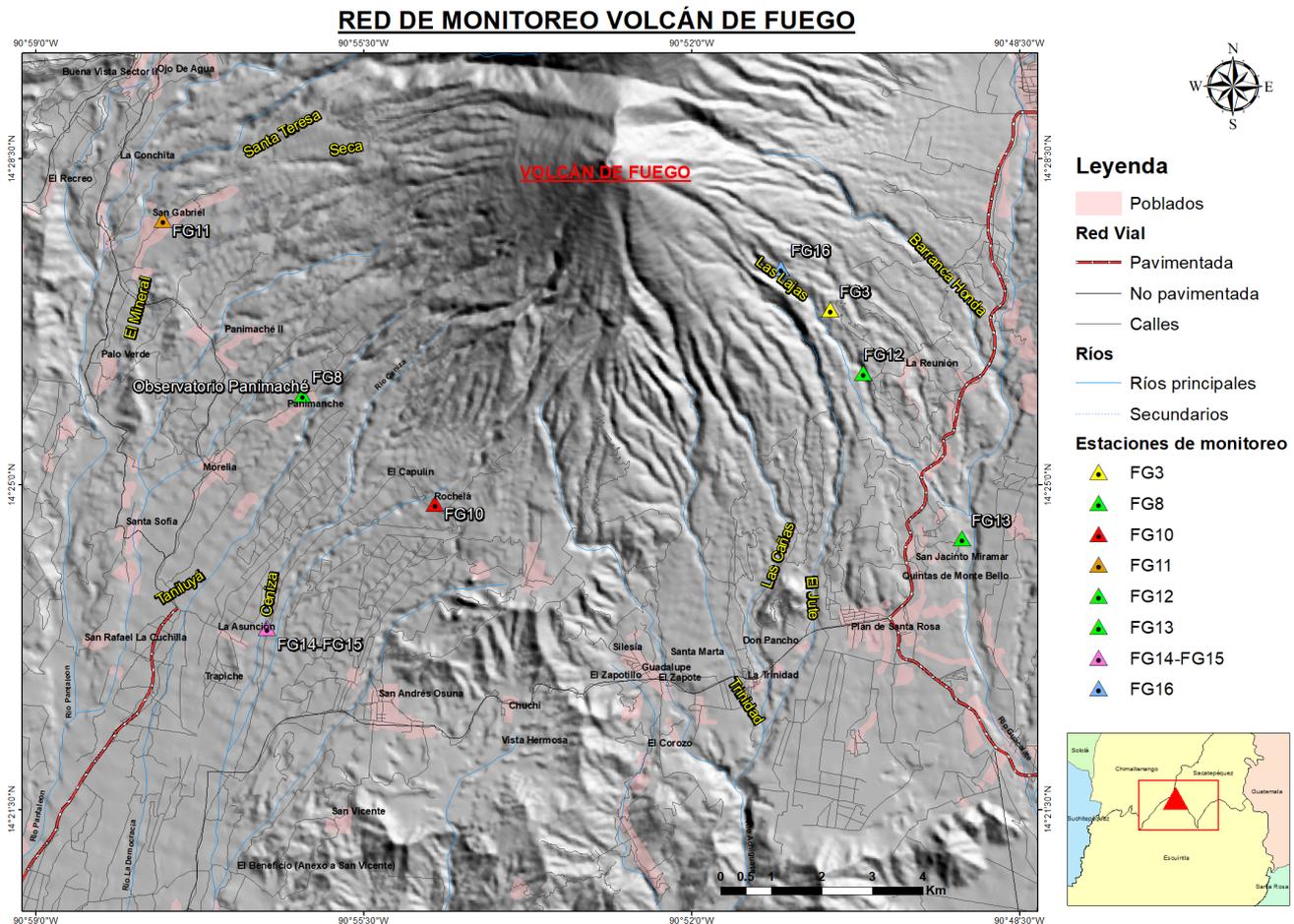


Figura 2: Red de monitoreo del volcán de Fuego. Los triángulos codificados por colores representan la ubicación de las estaciones multiparamétricas: amarillo para estaciones con un sismómetro y telemetría de transmisión de radio; verde para estaciones con un sismómetro, cámara, pluviómetro, sensores de infrasonido y telemetría 3G; rojo para estaciones con un sismómetro, telemetría 3G, cámara y sensores de infrasonido; naranja para estaciones con un sismómetro y telemetría 3G; y violeta para estaciones con un sismómetro, telemetría 3G y pluviómetro. Todas las estaciones están ubicadas en el flanco sur y cerca de las barrancas. Esta red completa se implementó después de la erupción del 3 de junio de 2018. El mapa insertado en la parte inferior derecha representa la ubicación geográfica del volcán de Fuego, que es exactamente la intersección de 3 departamentos: Chimaltenango en color cian, Sacatepéquez en color aguamarina y Escuintla en color verde.

1.2 Volcanes de Fuego, Pacaya y Santiaguito: características principales de los tres volcanes en erupción de Guatemala

El volcán de Pacaya es un gran complejo volcánico situado en la zona de falla del límite sur de la Caldera de Amatitlán, 30 km al sur de la ciudad de Guatemala [Kitamura y Matías 1995]. Este complejo incluye al cono compuesto de Pacaya, Cerro Grande y Cerro Chiquito, y al cono de escoria Cerro Chino [Gomez 2012], así como otros domos y flujos de composición riodácica a andesítica [Conway et al. 1992]. La actual cumbre de Pacaya está formada por dos conos superpuestos, el primer cono son los restos del colapso del “Viejo Pacaya” o “Pacaya Ancestral” y el segundo, conocido como el cono Mackenney, que se formó en 1965 en el flanco oeste del primer cono [Gomez 2012]. El Volcán

de Pacaya entró en erupción—por primera vez desde 1880—en 1961 y ha estado continuamente activo desde 1965, con fases explosivas—actividad estromboliana con eyección de bombas o actividad vulcaniana con caída de ceniza—alternando con fases efusivas [Bardintzeff y Deniel 1992]. El GVP enumera al menos 36 períodos eruptivos durante el Holoceno, con un Índice de Explosividad Volcánica (IEV) de hasta 3. La erupción de mayo de 2010 provocó una gran perturbación debido a la fuerte caída de tefra en las localidades aledañas al volcán, provocando el cierre del Aeropuerto Internacional La Aurora por seis días [Chigna et al. 2010]. El volcán de Pacaya actualmente tiene flujos de lava en el flanco noroeste, además de exhibir actividad explosiva.

El volcán de Fuego está ubicado directamente al sur del volcán Acatenango y se encuentra a 45 km de la

ciudad de Guatemala*. El complejo de Fuego está compuesto por los respiraderos más jóvenes de Fuego y los más antiguos de la Meseta [Chesner y Rose 1984]. El final de la actividad de la Meseta estuvo marcado por una avalancha de escombros hace alrededor de 8500 años. Luego, la actividad migró hacia el sur y comenzó a construir Fuego, que se convirtió en el foco de actividad del complejo hasta la actualidad [Basset 1996]. Fuego ha tenido al menos 60 erupciones históricas subplinianas y varios períodos más extensos (es decir, meses a años) de actividad estromboliana de bajo nivel [Lyons et al. 2009], con eventos IEV 4 altamente explosivos que finalizan períodos prolongados de actividad de menor nivel [Berlo et al. 2011]. La actividad estromboliana más reciente, continua y de bajo nivel, comenzó con una erupción IEV 2 el 21 de mayo de 1999, caracterizada por flujos de lava frecuentes y cortos (cientos de metros), explosiones piroclásticas, lahares y paroxismos de duración prolongada (es decir, 24 a 48 h) que producen flujos de lava más largos (de cientos a miles de metros), flujos piroclásticos y columnas eruptivas sostenidas. Esta actividad conduce a pequeñas erupciones casi todos los días y a una condición de “conducto abierto” [Lyons et al. 2009]. La erupción del 3 de junio de 2018, según científicos de INSIVUMEH y observaciones de campo, parece haber incluido un colapso parcial en la parte sureste de la estructura volcánica superior, generando un número considerable de corrientes de densidad piroclástica (PDCs, por sus siglas en inglés), que se desplazaron pendiente abajo y desbordaron la barranca Las Lajas. El volcán de Fuego mantiene en la actualidad un promedio de 15 emisiones de gas y cenizas por hora, avalanchas que recorren largas distancias y lahares.

El complejo volcánico Santa María-Santiaguito incluye el cono compuesto simétrico del Volcán Santa María y el complejo de domos de Santiaguito, que se extiende de este a oeste [Escobar-Wolf et al. 2010]. Estas estructuras están ubicadas a 110 km al oeste y 11 km al sur de las ciudades de Guatemala y Quetzaltenango, respectivamente [Lamb et al. 2019]. En 1902, Santa María produjo una devastadora erupción pliniana, que generó al menos 8.5 km³ de roca densa equivalente (RDE) de dacita, como depósitos de caída de ceniza y de lapilli de pómez, y dejó un cráter y una cicatriz del colapso en la base sur del edificio [Rhodes et al. 2018]. En 1922, el complejo volcánico Santiaguito comenzó a crecer dentro del cráter formado durante la erupción de 1902 y aún permanece activo, habiendo erupcionado más de 8.5 km³ de magma dacítico [Escobar-Wolf et al. 2010]. El complejo Santiaguito comprende cuatro domos: El Caliente (1922–1939; 1972–actualidad), La Mitad (1939–1949), El Monje (1949–1958) y El Brujo (1958–1986) [Rhodes et al. 2018]. En los últimos años, la actividad se ha concentrado en el domo El Caliente y consiste en la extrusión semicontinua de flujos de lava en bloques intercalados con frecuentes explosiones de gas y cenizas. Las escaladas ocasionales en la actividad

explosiva han incluido el colapso del domo y corrientes de densidad piroclástica [Lamb et al. 2019].

2 ¿CÓMO MONITOREAMOS ESTOS VOLCANES?

2.1 Capacidades

Tabla 2 enumera los instrumentos utilizados en cada uno de los tres volcanes en erupción continua. El volcán de Fuego es actualmente el más instrumentado y esto le ha permitido al INSIVUMEH monitorear de mejor forma la actividad volcánica de la superficie, así como la dinámica interna del volcán. La combinación de sensores de infrasonido, sensores sísmicos y cámaras web nos ha permitido estudiar mejor los lahares y los flujos de lava. Los lahares generan ambos tipos de señales (es decir, sísmicas y acústicas), por lo tanto, el contenido de amplitud y frecuencia de estas cambia cuando un lahar es generado y se mueve a favor de la pendiente. Estos cambios se pueden utilizar para describir y caracterizar la dinámica del lahar a lo largo de las barrancas. Por su parte, las fases volcánicas efusivas generan uno o más flujos de lava que duran días o incluso meses, de modo que los sensores sísmicos y acústicos registran señales continuas (es decir, *tremor*) relacionadas con la desgasificación permanente y los movimientos de magma producidos por estos flujos. Dichas señales continuas nos permiten definir, entre otros parámetros, la duración e intensidad de una fase efusiva. La actividad en el cráter del volcán de Fuego se estudia a través de cinco arreglos de sensores de infrasonido que nos permiten ubicar, caracterizar y detectar parámetros como la presión de cada una de las emisiones (gas y/o magma) que producen señales acústicas. Los objetivos para el 2022 al 2023 incluyen la automatización de tareas básicas como contar y clasificar los frecuentes eventos sismo-volcánicos de Fuego utilizando técnicas de aprendizaje automático. Para el volcán Pacaya, los datos sísmicos se estudian principalmente utilizando métodos básicos, pero ampliamente comprobados, como RSAM (Medición de amplitud sísmica en tiempo real), que rastrea la actividad sísmica de tipo “*tremor*”. Entre 2020 y 2022, se espera que se agreguen a la red Pacaya tres sensores del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), una cámara web y dos sensores sísmicos más (uno de período corto y uno de banda ancha). La sismicidad del volcán Santiaguito se monitorea y estudia utilizando tres sensores de banda ancha donados por la Universidad de Liverpool, Reino Unido, y un sensor de período corto. En un futuro cercano, el INSIVUMEH prevé rehabilitar tres estaciones de corta duración que actualmente no funcionan y que operan por telemetría analógica en la zona del volcán Santiaguito.

Los datos recopilados por los instrumentos de monitoreo se reciben en tiempo real y se almacenan en el centro de datos de INSIVUMEH. El formato de almacenamiento es miniSEED (en inglés, *Standard for*

*http://www.insivumeh.gob.gt/folletos/folleto_fuego.pdf

Tabla 2: Descripción de las redes de monitoreo volcánico

Volcán	Instrumentos				
	Sismómetro		Sensor acústico	Cámara	Estación meteorológica
	PC	BA			
Fuego	1	7	18	5	3
Pacaya	1	1	-	1	1
Santiaguito	1	3	-	1	-

the Exchange of Earthquake Data), aunque existen copias de seguridad en diferentes formatos (SAC, SEISAN, Earthworm). Los datos se comparten con otras instituciones en tiempo real (por ejemplo: VDAP-USGS, Universidad de Liverpool del Reino Unido, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador, Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales Nicaragua y el Servicio Sismológico Nacional México) a través del protocolo de comunicación SeedLink, el cual es posible luego de establecer un acuerdo entre las partes interesadas e INSIVUMEH. Sin embargo, los datos también se comparten con las personas a través de solicitudes oficiales. Las personas y las organizaciones técnicas o académicas pueden solicitar los datos a través de los canales establecidos por la institución (es decir, la oficina de libre acceso a la información del INSIVUMEH*).

Además de los datos de los sensores terrestres, el análisis de imágenes de satélite ha sido una herramienta muy útil para monitorear la radiación térmica y la dispersión de ceniza, así como para monitorear los flujos de lava durante largos períodos de tiempo. Además, la evaluación de los peligros volcánicos se realiza y actualiza mediante simulaciones computacionales de fenómenos volcánicos durante las crisis volcánicas, incluyendo la caída de cenizas y los flujos de lava. Estas simulaciones utilizan datos digitales de elevación obtenidos previamente con sobrevuelos realizados por personal de vulcanología.

2.2 Personal técnico-científico

Actualmente, en las instalaciones centrales del INSIVUMEH, el área de vulcanología está compuesta por un grupo de cinco personas con diferentes capacidades y habilidades que realizan diversas actividades. Cuatro personas con especialización en geología y un vulcanólogo realizan la evaluación de peligros volcánicos a través de diferentes técnicas, incluyendo la simulación de fenómenos volcánicos y vuelos de drones. También realizan actividades de campo para la recolección de datos y/o muestreo, a la vez que comunican y describen la amenaza volcánica a instituciones, organizaciones y al público en general. Dos personas especializadas en física monitorean y analizan las

señales geofísicas, principalmente con datos sísmicos e infrasónicos. El mantenimiento e instalación de los equipos de monitoreo es realizado por técnicos en electrónica (dos personas) y estudiantes de ingeniería electrónica (dos personas).

Además del personal de vulcanología en la instalación central de INSIVUMEH, existen observatorios locales cerca de cada volcán en erupción (Fuego, Pacaya y Santiaguito) que brindan vigilancia y monitoreo adicional de volcanes. En cada observatorio hay personal técnico que realiza actividades de monitoreo e inspecciones visuales en campo, elabora informes de actividad (tres veces al día) dirigidos al grupo de vulcanología en las instalaciones centrales de la ciudad, y brinda asistencia en las visitas de campo realizadas por los mismos.

3 GESTIÓN DE PELIGROS VOLCÁNICOS

INSIVUMEH participa en la gestión del riesgo volcánico en Guatemala como la entidad científica de la Secretaría Ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (SE-CONRED). El deber fundamental de INSIVUMEH es brindar información técnica y oportuna durante la preparación, mitigación y respuesta a peligros volcánicos, cumpliendo con tres funciones fundamentales: 1) monitoreo en tiempo real, 2) desarrollo de mapas de amenazas, y 3) difusión del conocimiento de la amenaza a la población. Para ello, el INSIVUMEH implementa dos herramientas fundamentales que están al servicio de la población: los boletines de actividad vulcanológica y la generación de mapas de amenazas. Los mapas oficiales de amenaza volcánica se han desarrollado en colaboración con agencias internacionales, como el USGS, con quien se elaboró un mapa del volcán Pacaya en 1987, después de una breve campaña geológica durante la cual fueron mapeados los principales depósitos volcánicos alrededor del volcán [Banks 1987]. INSIVUMEH también ha colaborado con instituciones como la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA, por sus siglas en inglés) y universidades extranjeras como MTU y la Universidad de Edimburgo (Reino Unido), para generar mapas de peligros de otros volcanes en el país. Actualmente, ocho volcanes guatemaltecos tienen mapas de amenaza

*acesso.informa@insivumeh.gob.gt

za: Tacaná, Santa María-Santiago, Cerro Quemado, Atitlán, Acatenango, Fuego, Agua y Pacaya.

Debido a la actividad eruptiva frecuente y dinámica de los volcanes Fuego, Pacaya y Santiaguito en los últimos 30 años, INSIVUMEH ha desarrollado dos tipos de productos cartográficos: mapas de crisis volcánica y mapas oficiales de amenazas volcánicas. Los primeros se realizan durante un paroxismo, señalando amenazas como la dispersión de cenizas o la dirección de un nuevo flujo piroclástico. Estos mapas son útiles para informar a la población sobre lo inmediato a lo que están expuestos en un evento determinado. Los segundos son mapas probabilísticos que representan las áreas propensas a la presencia de peligros volcánicos individuales. Uno de los principales ejemplos de la generación de mapas de crisis son los que se produjeron después de la erupción del volcán de Fuego el 3 de junio de 2018, debido a la gran cantidad de material que terminó en los ríos alrededor del volcán, y la posibilidad de un nuevo paroxismo. Estos mapas fueron el resultado de simulaciones producidas por el *software* LaharZ [Schilling 1998], utilizando parámetros específicos del volcán, como la topografía, los puntos de partida de los lahares y la actividad histórica. Los mapas formularon tres nuevos escenarios: dos para lahares (lluvias moderadas y lluvias intensas) y un tercero para flujos piroclásticos. Los mapas oficiales están disponibles en el sitio web de INSIVUMEH*. INSIVUMEH también trabajó con la organización no gubernamental *Map Action*, para producir un mapa interactivo en 3D. El mapa interactivo es una herramienta muy útil para que la población tenga una mejor idea de cómo se vería afectada por las diferentes amenazas. Esta herramienta se puede ver en línea[†].

Los mapas de peligro para los volcanes Pacaya, Fuego y Santiaguito son actualizados constantemente después de las evaluaciones de campo y cuando se adquieren nuevos datos de fotogrametría mediante vuelos de drones realizados alrededor del edificio volcánico. Estos mapas también incluyen eventos eruptivos recientes, datos históricos y modelos de diferentes productos volcánicos, como lahares y flujos de lava. También se han desarrollado capacidades para el uso de modelos de peligro volcánico, tales como: LaharZ [Schilling 1998], Downflow [Tarquini y Favalli 2011], Q-lavHA [Mossoux et al. 2016], MrLavaLoba [Tarquini et al. 2018], EMapPro [Aravena y Cioni 2019], Ash3D [Schwaiger et al. 2012], Tephra [Bonadonna 2005], TephraProb [Biass et al. 2016] y Eject! [Mastin 2001].

* <http://insivumeh.gob.gt/geofisica/vulcanologia/mapas-de-amenaza-volcanica/>

[†]<http://arcg.is/18irm9>

4 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE LA INFORMACIÓN

4.1 Información vulcanológica

INSIVUMEH cuenta con una red de monitoreo que se utiliza para generar información en tiempo real que posteriormente es procesada y analizada por el personal de vulcanología. Se generan cuatro tipos de informes:

1. Boletines diarios: resumen la información volcánica de los volcanes activos en erupción en el país, incluyendo información esencial como las condiciones atmosféricas (datos generados por el departamento de clima de INSIVUMEH) y el comportamiento eruptivo de las últimas 24 horas. Las recomendaciones generales se enmarcan en este tipo de boletines.
2. Boletines especiales: emitidos en el momento de un aumento de actividad, actividad que no se considera habitual, como la dispersión de ceniza, un nuevo paroxismo o el descenso de lahares. Además, se incluyen recomendaciones especiales (por ejemplo, seguir más de cerca la actividad y estar atento a los cambios repentinos) a las instituciones que deben realizar una tarea concreta, como la SE-CONRED, DGAC (Dirección General de Aviación Civil), CAMINOS (Dirección General de Carreteras), COVIAL (Unidad de Fiscalización de Mantenimiento Vial) y público en general, priorizando en las comunidades ubicadas en las cercanías del área.
3. Boletines semanales: resumen la actividad volcánica observada durante una semana para resaltar cambios significativos a mayor escala. Estos boletines incluyen una breve recomendación (por ejemplo, mantenerse alejado de las áreas identificadas como de alta amenaza o extender el nivel de alerta actual) a las instituciones con responsabilidad inmediata.
4. Informes mensuales: recopilan la información de la actividad volcánica que se registró durante el mes e incluyen estadísticas de los eventos registrados y datos generales en una ventana de tiempo mayor que la de un boletín semanal.

La información de los informes y boletines es de libre acceso y está disponible en el sitio web del INSIVUMEH, en la pestaña “Boletines vulcanológicos”[‡]. El acceso también se puede solicitar por correo electrónico[§].

La información pertinente de los boletines diarios, semanales, mensuales y boletines especiales es compar-

[‡] <http://www.insivumeh.gob.gt/vulcanologia/>

[§] acceso.informa@insivumeh.gob.gt

tida por correo electrónico a instituciones gubernamentales como CONRED, DGAC, Instituto Guatemalteco de Turismo, CAMINOS, parques nacionales en áreas volcánicas y municipios, con el fin de que distribuyan la información a las personas y comunidades que puedan verse afectadas por las amenazas.

4.2 Divulgación

La información descrita anteriormente se difunde a través de las redes sociales (Facebook: @insivumeh, Twitter: @insivumehgt) al público, para que se tomen las consideraciones necesarias, dependiendo del producto volcánico que se esté generando y cómo ese producto puede afectar la población en general (por ejemplo, en caso de caída de ceniza volcánica). La población se mantiene informada diariamente con una actualización de la actividad volcánica de los tres volcanes en erupción, especificando los cambios registrados en tiempo real.

La información primaria de los mapas de amenaza volcánica se comparte con instituciones, como la SE-CONRED, que posteriormente realizan el análisis de vulnerabilidad y así agregan un valor o parámetro extra para obtener mapas de riesgo, donde se identifican viviendas, rutas de evacuación, áreas seguras, refugios, etc.

Con el fin de difundir y transmitir más eficazmente la información sobre peligros, el INSIVUMEH designa especialistas técnicos en el campo para explicar los mapas y los peligros volcánicos a las comunidades. Además, la socialización de mapas de amenaza volcánica (dispersión de ceniza, coladas de lava, lahares, PDCs, caída de balísticos) con apoyo de protección civil (SE-CONRED) se logra a través de diferentes actividades, como redes sociales y campañas de socialización realizadas en las instalaciones del observatorio local.

5 NECESIDADES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS A FUTURO

No ha pasado mucho tiempo desde la erupción del volcán de Fuego el 3 de junio de 2018, pero suficiente para realizar los análisis correspondientes que resaltan la falta de un sistema de monitoreo volcánico robusto y confiable para el grupo de volcanes de muy alta y alta peligrosidad en Guatemala, y la necesidad de programas continuos de desarrollo de capacidades. En este sentido, el apoyo y fortalecimiento brindado por el Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP, por sus siglas en inglés), como parte de la cooperación con el USGS, durante este gran paroxismo y también en los últimos años, ha sido invaluable. Las mejoras a la red de monitoreo durante julio, agosto y septiembre hicieron posible manejar y procesar una cantidad sustancial e importante de datos para las siguientes tres erupciones ocurridas durante octubre y noviembre de 2018. Esto permitió proporcionar más información confiable

en tiempo real a la población e instituciones encargadas de la gestión de riesgos y prevención de desastres (por ejemplo, CONRED). Por otro lado, también se ha desarrollado la capacitación en el uso de metodologías para un manejo adecuado, oportuno y práctico de una crisis volcánica, la cual fue brindada por VDAP. Cabe mencionar la metodología “Árbol de Eventos”, que permite inferir adecuadamente cuál es el escenario eruptivo más probable en un volcán activo, tomando en cuenta factores geológicos recientes e históricos, y el tipo de amenazas que el volcán es capaz de producir, entre otros. Después de un trabajo dedicado y constante junto con los vulcanólogos del VDAP, esta metodología fue adaptada para cada volcán del grupo de muy alta peligrosidad en el ranking nacional de volcanes. Si bien el éxito de esta metodología se basa en la cantidad de información disponible y el conocimiento de la actividad histórica y actual de cada volcán, esto podría brindar una perspectiva muy valiosa sobre el posible impacto de las amenazas generadas en un paroxismo volcánico.

El monitoreo de volcanes que mantienen un estado de erupción casi continua representa un gran desafío, ya que implica una inversión de recursos humanos de diferentes habilidades y especialidades, así como tecnología instrumental de alta calidad. Luego de la erupción del volcán de Fuego el 3 de junio de 2018, INSIVUMEH pudo adquirir equipos de monitoreo que producen datos de mayor resolución y permiten un análisis más amplio sobre las amenazas que se presentan en el flanco sur de este volcán. Sin embargo, la cantidad de personal contratado para el monitoreo instrumental y la evaluación de amenazas, es insuficiente para analizar todos los datos nuevos, por lo que se necesitan nuevas contrataciones para llenar los vacíos. También es necesario incluir más personal técnico para la instalación, reparación y movilización de equipos de monitoreo en el campo (por ejemplo, sismómetros, estaciones multiparamétricas, etc.). En cuanto a los volcanes Pacaya y Santiaguito, el monitoreo sísmico se mantiene utilizando una y cuatro estaciones sísmicas, respectivamente. Resultados obtenidos en campañas anteriores en estos dos volcanes indican que se necesitan más estaciones para capturar todas las señales producidas por estos volcanes y así generar un esfuerzo de monitoreo integral.

Una de las metas de monitoreo más importantes a corto y mediano plazo es establecer una línea base multiparamétrica de actividad volcánica, para cada uno de los tres volcanes en erupción. Esto requiere una gran cantidad de datos continuos y el uso de herramientas computacionales con las que se puedan determinar (casi en tiempo real) el estado de la actividad volcánica. Para el volcán de Fuego, se ha desarrollado una línea base y esta ha sido actualizada continuamente durante aproximadamente un año, basándose principalmente en el uso de datos sísmicos e infrasónicos. Sin embargo, estos avances recientes deben refinarse continuamente debido a la naturaleza dinámica de la actividad de Fuego, por lo que es esencial mantener un flujo de datos conti-

nuo desde la red. Los volcanes Pacaya y Santiaguito aún no cuentan con estas tecnologías de monitoreo.

Actualmente se está finalizando el Ranking de Peligrosidad Relativa de los Volcanes de Guatemala, que servirá como guía para la planificación del monitoreo futuro de todos los volcanes que también representan algún grado de peligro para la población. Los resultados de este proyecto dictarán los pasos a seguir en el esfuerzo de las evaluaciones de peligros, así como el monitoreo instrumental de todos los volcanes activos y potencialmente activos. La iniciativa priorizará los volcanes que se encuentran actualmente en los grupos de peligrosidad muy alta y alta, y colocará los volcanes que están en los grupos de peligrosidad media, baja y muy baja en un plan de acción, de mediano a largo plazo.

Otro aspecto importante que se está abordando actualmente es el establecimiento de protocolos de procedimiento durante crisis volcánicas, mediante el uso de herramientas como una escala de colores para los niveles de alerta volcánica y el análisis probabilístico del comportamiento volcánico (conocido como “Árboles de Eventos”). Estos se están desarrollando actualmente en INSIVUMEH, junto con mapas de amenazas para diferentes escenarios. Todos estos esfuerzos presentan una hoja de ruta para un proceso de toma de decisiones más robusto y transparente, por lo que el desafío a corto plazo es hacer un uso sistemático de todos estos protocolos cuando se requieran.

AGRADECIMIENTOS

Más que un simple “gracias”, este es un reconocimiento póstumo a todas las personas que fueron afectadas por la erupción del Volcán de Fuego el 3 de junio de 2018, así como al colaborador de CONRED, Juan Galindo, quien falleció tratando de salvar a otros. Esperamos que esta erupción presente una lección de advertencia y un llamado a la acción para las instituciones y organizaciones nacionales e internacionales del mundo. Hacemos un llamado al gobierno local para que invierta en prevención y vigilancia volcánica. No olvidés el pasado, porque lo mismo sucederá en el futuro.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

La **Introducción** fue preparada por Mérida R., Chun C. y Chigna G. Las secciones **¿Cómo monitoreamos estos volcanes?** y **Necesidades, desafíos y perspectivas a futuro** fueron preparadas por Roca A. y Argueta P. González D. y Juárez F. prepararon las secciones **Gestión de peligros volcánicos** y **Difusión y divulgación de la información**, respectivamente.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los boletines de volcanes están disponibles en <http://www.insivumeh.gob.gt/vulcanologia/>. Los datos sísmicos y acústicos están disponibles a solicitud en acceso.informa@insivumeh.gob.gt. BOSAI MAP del Volcán Santiaguito se puede descargar en http://jicabosai.ceprede-nac.org/application/files/9715/4048/4757/BOSAI_MAP_for_Santiaguito.pdf mientras que BOSAI MAP del volcán de Pacaya se puede encontrar en http://jicabosai.ceprede-nac.org/application/files/5315/4048/4754/BOSAI_MAP_for_Pacaya.pdf.

DERECHOS DE AUTOR

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando se dé el crédito apropiado al/los autor(es) original(es) y la fuente, proporcionando un enlace a la Creative Commons License, e indicando si se realizaron cambios.

REFERENCIAS

- Aravena, A. y R. Cioni (2019). *ECMapProb*. URL: <https://vhub.org/resources/ecmapprob> (visitado 15-04-2021).
- Banks, N. G. (1987). *Evaluación preliminar de la amenaza de la actividad del volcán de Pacaya, Guatemala, C.A.* Inf. téc.
- Bardintzeff, J.-M. y C. Deniel (1992). «Magmatic evolution of Pacaya and Cerro Chiquito volcanological complex, Guatemala». *Bulletin of Volcanology* 54 (4), págs. 267-283. DOI: 10.1007/bf00301482.
- Basset, T. S. (1996). «Histoire éruptive et évaluation des aléas du volcan Acatenango (Guatemala)». fre. DOI: 10.13097/ARCHIVE-OUVERTE/UNIGE:98295.
- Berlo, K., J. Stix, K. Roggensack y B. Ghaleb (2011). «A tale of two magmas, Fuego, Guatemala». *Bulletin of Volcanology* 74 (2), págs. 377-390. DOI: 10.1007/s00445-011-0530-8.
- Biass, S., C. Bonadonna, L. Connor y C. Connor (2016). «TephraProb: a Matlab package for probabilistic hazard assessments of tephra fallout». *Journal of Applied Volcanology* 5 (1). DOI: 10.1186/s13617-016-0050-5.
- Bohnenberger, O. (1969). *Los focos eruptivos Cuaternarios de Guatemala*. Inf. téc., págs. 23-24.
- 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). DOI: 10.1029/2003jb002896.
- Carr, M. J., M. D. Feigenson, L. C. Patino y J. A. Walker (2003). «Volcanism and geochemistry in Central America: Progress and problems». *Inside the*

- Subduction Factory*. American Geophysical Union, págs. 153-174. doi: [10.1029/138gm09](https://doi.org/10.1029/138gm09).
- Carr, M. J., W. I. Rose y D. G. Mayfield (1979). «Potassium content of lavas and depth to the seismic zone in central america». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 5 (3-4), págs. 387-401. doi: [10.1016/0377-0273\(79\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0377-0273(79)90025-8).
- Chesner, C. A. y W. I. Rose (1984). «Geochemistry and evolution of the fuego volcanic complex, Guatemala». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 21 (1-2), págs. 25-44. doi: [10.1016/0377-0273\(84\)90014-3](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90014-3).
- Chigna, G., X. León, F. Valdez, L. Arriola y M. Mota (2010). *Reporte de erupción Volcan Pacaya (1402-11)*. Inf. téc.
- Conway, F. M., J. F. Diehl y O. Matias (1992). «Paleomagnetic constraints on eruption patterns at the Pacaya composite volcano, Guatemala». *Bulletin of Volcanology* 55 (1-2), págs. 25-32. doi: [10.1007/bf00301117](https://doi.org/10.1007/bf00301117).
- Escobar-Wolf, R. P., J. F. Diehl, B. S. Singer y W. I. Rose (2010). « $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and paleomagnetic constraints on the evolution of Volcan de Santa Maria, Guatemala». *Geological Society of America Bulletin* 122 (5-6), págs. 757-771. doi: [10.1130/b26569.1](https://doi.org/10.1130/b26569.1).
- Ewert, J. W. (2007). «System for Ranking Relative Threats of U.S. Volcanoes». *Natural Hazards Review* 8 (4), págs. 112-124. doi: [10.1061/\(asce\)1527-6988\(2007\)8:4\(112\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2007)8:4(112)).
- Gall, F. e I. G. Nacional (1976). *Diccionario Geográfico de Guatemala*. 2.^a ed. Guatemala: Instituto Geográfico Nacional.
- Gomez, R. O. M. (2012). *Notes on a Map of the 1961-2010 Eruptions of Volcán de Pacaya, Guatemala*. Inf. téc. doi: [10.1130/2012.dmch010](https://doi.org/10.1130/2012.dmch010).
- Kitamura, S. y O. Matías (1995). «Tephra Stratigraphic Approach to the Eruptive History of Pacaya Volcano, Guatemala». *The Science Reports of The Tohoku University* 45, págs. 1-41.
- Lamb, O. D., A. Lamur, A. Diaz-Moreno, S. D. Angelis, A. J. Hornby, F. W. von Aulock, J. E. Kendrick, P. A. Wallace, E. Gottschämmer, A. Rietbrock, I. Alvarez, G. Chigna e Y. Lavallée (2019). «Disruption of Long-Term Effusive-Explosive Activity at Santiaguito, Guatemala». *Frontiers in Earth Science* 6. doi: [10.3389/feart.2018.00253](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00253).
- Lyons, J. J., G. P. Waite, W. I. Rose y G. Chigna (2009). «Patterns in open vent, strombolian behavior at Fuego volcano, Guatemala, 2005-2007». *Bulletin of Volcanology* 72 (1), págs. 1-15. doi: [10.1007/s00445-009-0305-7](https://doi.org/10.1007/s00445-009-0305-7).
- Mastin, L. G. (2001). *A simple calculator of ballistic trajectories for blocks ejected during volcanic eruptions*. Inf. téc. doi: [10.3133/ofr0145](https://doi.org/10.3133/ofr0145).
- Mossoux, S., M. Saey, S. Bartolini, S. Poppe, F. Canters y M. Kervyn (2016). «Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows». *Computers & Geosciences* 97, págs. 98-109. doi: [10.1016/j.cageo.2016.09.003](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.09.003).
- Rhodes, E., B. M. Kennedy, Y. Lavallée, A. Hornby, M. Edwards y G. Chigna (2018). «Textural Insights Into the Evolving Lava Dome Cycles at Santiaguito Lava Dome, Guatemala». *Frontiers in Earth Science* 6. doi: [10.3389/feart.2018.00030](https://doi.org/10.3389/feart.2018.00030).
- Schilling, S. P. (1998). *LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones*. Inf. téc.
- Schwaiger, H. F., R. P. Denlinger y L. G. Mastin (2012). «Ash3d: A finite-volume, conservative numerical model for ash transport and tephra deposition». *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 117 (B4), n/a-n/a. doi: [10.1029/2011jb008968](https://doi.org/10.1029/2011jb008968).
- Stoiber, R. E. y M. J. Carr (1973). «Quaternary volcanic and tectonic segmentation of Central America». *Bulletin Volcanologique* 37 (3), págs. 304-325. doi: [10.1007/bf02597631](https://doi.org/10.1007/bf02597631).
- Tarquini, S., M. de'Michieli Vitturi, E. Jensen, G. Pedersen, S. Barsotti, D. Coppola y M. Pfeffer (2018). «Modeling lava flow propagation over a flat landscape by using MrLavaLoba: the case of the 2014-2015 eruption at Holuhraun, Iceland». *Annals of Geophysics* 61 (Vol 61 (2018)). ISSN: 2037416X, 15935213. doi: [10.4401/ag-7812](https://doi.org/10.4401/ag-7812).
- Tarquini, S. y M. Favalli (2011). «Mapping and DOWNFLOW simulation of recent lava flow fields at Mount Etna». *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 204 (1-4), págs. 27-39. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2011.05.001](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2011.05.001).
- Walker, J. A., M. J. Carr, L. C. Patino, C. M. Johnson, M. D. Feigenson y R. L. Ward (1995). «Abrupt change in magma generation processes across the Central American arc in southeastern Guatemala: flux-dominated melting near the base of the wedge to decompression melting near the top of the wedge». *Contributions to Mineralogy and Petrology* 120 (3-4), págs. 378-390. doi: [10.1007/bf00306515](https://doi.org/10.1007/bf00306515).
- Walker, J. A. (1981). «Petrogenesis of Lavas from Cinder Cone Fields behind the Volcanic Front of Central America». *The Journal of Geology* 89 (6), págs. 721-739. doi: [10.1086/628638](https://doi.org/10.1086/628638).