

# Monitoreo volcánico y evaluación de amenaza en El Salvador

Rodolfo Castro\*, Eduardo Gutiérrez

*Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,  
Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), El Salvador.*

## RESUMEN

La cadena volcánica salvadoreña forma parte del Arco Volcánico de América Central y está localizada dentro de la zona conocida como cinturón de fuego del Pacífico. El Salvador es un país donde se encuentran al menos 20 estructuras volcánicas que han estado activas durante el Holoceno y donde la mayor parte de la población, incluyendo la ciudad capital San Salvador, está ubicada en las proximidades de algún complejo volcánico. Actualmente, seis volcanes activos son continuamente monitoreados por el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, que es parte del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales. El monitoreo volcánico se realiza mediante técnicas de monitoreo sísmicas, geoquímicas, visuales, entre otras. Como complemento del trabajo de monitoreo, se han desarrollado mapas de amenaza volcánica y redes de observadores locales constituyendo así sistemas de alerta temprana ante futuras erupciones. Estas iniciativas, en conjunto con la dirección general de la protección civil, persiguen el objetivo de reducir el riesgo por actividad volcánica en El Salvador.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.183201> [PDF EN].

## 1 INTRODUCCIÓN

El Salvador pertenece al cinturón de fuego del Pacífico. La cordillera volcánica que atraviesa el país de oeste a este, paralela a la costa, forma parte del Arco Volcánico de América Central (CAVA, por sus siglas en inglés) y su origen se debe a la subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, lo cual genera sismicidad intensa y fusión parcial del manto terrestre. El magma producido atraviesa la placa del Caribe a lo largo de redes de fracturas hasta alcanzar la superficie, donde tienen lugar las erupciones volcánicas y la formación de estructuras volcánicas. El resultado de este proceso, que toma varios miles de años [Bosse et al. 1976], es la formación del eje volcánico que cruza todo el país. Más del 90% del subsuelo nacional consiste en materiales volcánicos cenozoicos y cuaternarios [Meyer-Abich 1956; Bosse et al. 1976; Kattan et al. 2017].

### 1.1 Vulcanismo activo en El Salvador

Según el [Global Volcanism Program \[2013\]](#) [ver también [Siebert et al. 2011](#)], existen 20 volcanes en El Salvador que han tenido actividad durante el Holoceno ([Tabla 1](#)). De éstos, 6 se consideran activos debido a que han presentado actividad durante los últimos 500 años o por su actividad fumarólica actual [[Kattan et al. 2017](#); [MARN 2019a](#)], y son monitoreados sistemáticamente. Estos son, de oeste a este, los volcanes Izalco, Santa Ana, San Salvador, Ilopango, San Vicente y San Miguel ([Figura 1](#)). Izalco (1950 m s.n.m.), Santa Ana (2381 m s.n.m.), San Salvador (1890 m s.n.m.), San Vicente (2182 m s.n.m.) y San Miguel (2130 m s.n.m.) son

estratovolcanes de composición basáltica-andesítica a andesítica mientras que Ilopango es una gran estructura de caldera (13 por 17 km) y presenta una composición riodacítica.

Los volcanes Santa Ana y San Miguel entraron en erupción por última vez en octubre de 2005 y diciembre de 2013, respectivamente. El volcán Santa Ana se caracteriza por una actividad freatomagmática frecuente. Durante su última erupción (5 de octubre de 2005), piroclastos balísticos cayeron hasta a 2.5 km del cráter, oleadas piroclásticas afectaron la ladera oriental del volcán, lahares post eruptivos afectaron la costa del lago de Coatepeque y 1.5 millones de m<sup>3</sup> de ceniza fueron emitidas, afectando a algunos pueblos y caminos cercanos. El volcán San Miguel presenta erupciones, típicamente, de estilo estromboliano. En su último episodio eruptivo importante (29 de diciembre de 2013) expulsó piroclastos balísticos hasta a 2.5 km del cráter, produjo una columna eruptiva de 7.6 km de altura y 850000 m<sup>3</sup> de ceniza, afectando principalmente a la flora y fauna cerca del cráter. El volcán Izalco, el más joven de El Salvador, inició su construcción en el siglo XVIII y se caracteriza por una actividad estromboliana y efusiva. Su última erupción fue en 1966. El volcán de San Salvador, que entró en erupción por última vez en 1917 con una erupción tipo estromboliana que construyó el cono de escoria Boqueroncito, emitió ceniza en la ladera SO del volcán y un flujo de lava [[Ferrés 2014](#)]. La caldera de Ilopango es, quizás, el volcán más poderoso y peligroso de El Salvador, con actividad pliniana, freatomagmática y efusiva en su historia eruptiva [[Pedrazzi et al. 2019](#)]; su última erupción generó el domo dacítico Islas Quemadas en 1879–1880. La última erupción del volcán de San Vicente se desconoce, sin embargo,

\*Autor de correspondencia: [rodolfo.a.castro@gmail.com](mailto:rodolfo.a.castro@gmail.com)

**Tabla 1:** Volcanes en El Salvador activos durante el Holoceno [Global Volcanism Program 2020].

Volcán	Tipo de volcán	Ultima erupción conocida
Chingo	Estratovolcán	Desconocida
San Diego	Campo volcánico	Desconocida
Cerro Singuil	Cono piroclástico	Desconocida
Cordillera Apaneca	Estratovolcán(es)	Desconocida
Santa Ana	Estratovolcán	2005
Izalco	Estratovolcán	1966
Coatepeque	Caldera	Desconocida
San Salvador	Estratovolcán	1917
Cerro Cinotepeque	Campo volcánico	Desconocida
Guazapa	Estratovolcán	Desconocida
Ilopango	Caldera	1880
San Vicente	Estratovolcán	Desconocida
Campo Apastepeque	Campo volcánico	Desconocida
Taburete	Estratovolcán	Desconocida
Tecapa	Estratovolcán	Desconocida
Usulután	Estratovolcán	Desconocida
El Tigre	Estratovolcán	Desconocida
Chinameca	Estratovolcán	Desconocida
San Miguel	Estratovolcán	2020
Laguna Aramuaca	Maar	Desconocida

presenta actividad fumarólica en la actualidad. En este punto, es necesario recordar la importancia de desarrollar estudios geológicos y vulcanológicos para tener una idea clara de la estratigrafía y la historia eruptiva de los volcanes.

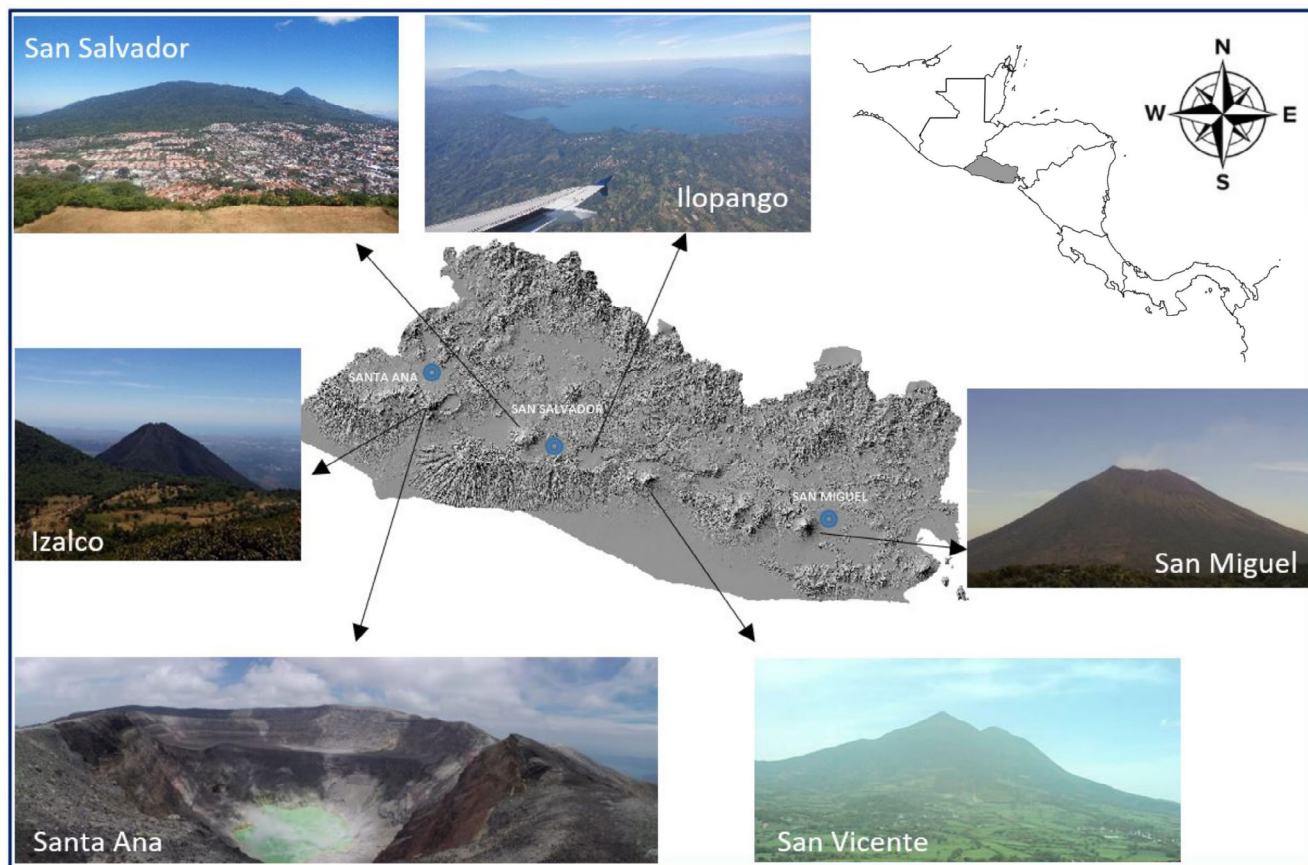
Se estima que alrededor de 2 millones de personas (aproximadamente el 30% de la población total del país) viven en las áreas circundantes a estos volcanes activos y, por lo tanto, están expuestas a diferentes peligros volcánicos. De estas, más de 1.5 millones se concentran en el área metropolitana de San Salvador (Censo de 2007) que incluye, además de la ciudad capital, 13 municipios cercanos al complejo volcánico de San Salvador y la Caldera de Ilopango (Figura 1).

## 1.2 Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA): la institución a cargo del monitoreo volcánico en El Salvador.

El Servicio Geológico Nacional se estableció en 1955 como un departamento del Ministerio de Obras Públicas. Su director fue el Dr. Helmut Meyer-Abich, geólogo alemán trabajando en la instrumentación sísmica para el monitoreo sísmico [Meyer-Abich 1956]. Posteriormente, en 1964 y por convenio ejecutivo, el Servicio Geológico Nacional y la Sección de Laboratorio y Experimentos se unieron para crear el Centro de Investigaciones Geotécnicas (CIG). Esta fue una unidad secundaria del Ministerio de Obras Públicas, mejorando en investigación, personal profesional y herramientas de trabajo. De 1967 a 1971, se desarrolló el mapa geológico salva-

doreño en colaboración con la misión geológica alemana y el CIG. Años más tarde, en mayo de 1997, se fundó el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) (orden ejecutiva núm. 27) como producto del artículo 117 de la Constitución de la República de El Salvador, la cual establece: “*Es deber del Estado proteger los recursos naturales, así como la diversidad e integridad del medio ambiente, para garantizar el desarrollo sostenible*”. El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) fue creado en 2001 como una institución científica adscrita al MARN. El SNET fue creado en respuesta a la crisis generada por los terremotos de enero y febrero de 2001 y ante la necesidad de fortalecer la institución científico-técnica encargada del monitoreo y evaluación de fenómenos y amenazas naturales. Incluyó al personal y departamentos del CIG (en particular geología, sismología y vulcanología), así como al servicio meteorológico e hidrológico, anteriormente adscrito al Ministerio de Agricultura, y a un nuevo departamento de gestión de riesgos. En el año 2007, el SNET se incorporó al MARN con idéntico organigrama y cambió su nombre a Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA). En el año 2011, se creó el Centro de Monitoreo Integrado de Amenazas Naturales como parte de DGOA, donde actualmente se realiza vigilancia volcánica 24/7 junto con vigilancia sísmológica, de deslizamientos, hidrológica y meteorológica. Años después, en mayo de 2016, se redefinieron algunas responsabilidades del MARN (acuerdo No. 139):

1. Desarrollar investigaciones científicas y estudios especializados para usos relacionados con la pre-



**Figura 1:** Ubicación de los seis volcanes activos monitoreados de El Salvador y sus principales ciudades. La imagen de fondo es un mapa de sombras de MARN [2019a]. Imágenes de Caldera de Ilopango (Diciembre 2016), volcán de San Salvador (Noviembre 2017), volcán de Izalco (Febrero 2016) y volcán de Santa Ana (Marzo 2018) tomadas por R. Castro. Imagen del volcán de San Vicente (Julio 2018) tomada por M.A. Serra; y la del volcán de San Miguel obtenida con la cámara web del MARN en Febrero 2020.

vención y reducción de riesgos, tanto en el campo de desastres y ordenamiento territorial, y transferir los resultados de las investigaciones y estudios a los organismos gubernamentales responsables, para que cada uno ejecute las recomendaciones según su capacidad.

2. Desplegar instrumentación y realizar monitoreo sistemático de procesos y fenómenos meteorológicos, hidrológicos, sismológicos, volcánicos y geotécnicos con fines de alerta.
3. Validar y difundir información, de manera oportuna y eficiente, a las autoridades y la población en general, sobre condiciones de amenaza y vulnerabilidad cuya magnitud e importancia puedan traducirse en pérdidas y daños.
4. Limitar la territorialidad de los impactos de los fenómenos y procesos peligrosos, así como de la probable naturaleza de las pérdidas y daños.
5. Brindar apoyo científico y técnico para el diseño, instalación y operación de Sistemas de Alerta Tem-

prana, en coordinación con otras instituciones y agencias competentes.

En la última reestructuración del MARN, que tuvo lugar en 2019, la DGOA cambió su denominación a Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales (DOA), la cual actualmente incluye al Centro de Monitoreo Integrado. Desde su creación, la DOA ha trabajado en colaboración con organizaciones nacionales e internacionales (ej. universidades, agencias, ONGs, servicios geológicos), especialmente con la Dirección General de Protección Civil para emitir alertas tempranas de peligros naturales.

## 2 ¿COMO MONITOREAMOS ESTOS VOLCANES?

A esta fecha (en 2020), el personal a cargo de la investigación y monitoreo de volcanes en el MARN está compuesto por 14 personas. Estas incluyen tres expertos en vulcanología y un geólogo, con el apoyo permanente de cinco técnicos expertos en monitoreo sísmico y cinco técnicos especializados en monitoreo de amenazas geológicas. El personal del observatorio realiza un monito-

reo continuo en dos turnos de 10 y 14 horas al día, los 365 días del año.

Los principales parámetros monitoreados para identificar cambios en la actividad de los volcanes salvadoreños son: actividad sísmica, mediciones directas de plumas volcánicas y gases emitidos a través del suelo (cantidad y composición), química del agua (lagos, lagunas, manantiales y pozos) y deformación del suelo [MARN 2019b]. La Tabla 2 muestra las técnicas empleadas en cada uno de los seis volcanes monitoreados. Los volcanes Santa Ana, San Salvador y San Miguel tienen el nivel más alto de instrumentación debido a su reciente actividad y nivel de riesgo [MARN 2019a]. Ver mapas de la distribución de la red de monitoreo en la Figura 2.

La estrategia de monitoreo de volcanes en MARN involucra técnicas variadas, las cuales incluyen estaciones permanentes y mediciones puntuales durante campañas de campo:

1. Monitoreo sísmico: existen sismómetros desplegados alrededor de los volcanes (desde 1984 para el volcán San Salvador y desde 2002 para los otros volcanes monitoreados) con el fin de registrar señales sísmicas asociadas al fracturamiento de roca y al movimiento de fluidos. La instrumentación consta de redes de estaciones sísmicas telemétricas (14 acelerógrafos, 4 de banda ancha y 18 de período corto). Si es necesario, durante una crisis eruptiva o cuando se daña algún equipo, también se pueden instalar estaciones portátiles. Desde 2019, las funciones de monitoreo incluyen conteos diarios de los diferentes tipos de señales registradas, clasificación automática de señales sísmicas volcánicas mediante el *Repeating Earthquake Detector* [REDPy; Hotovec-Ellis y Jeffries 2016] y la alarma *Real-time Seismic-Amplitude Measurement* (RSAM) para detectar cambios de frecuencia.
2. Monitoreo geoquímico: desde 2018, se lleva a cabo anualmente el muestreo directo de gas en cada volcán monitoreado, a partir del uso de un equipo MultiGAS que permite la medición de H, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Desde 2008, las emisiones de SO<sub>2</sub> se miden continuamente en los volcanes San Miguel y Santa Ana usando Espectroscopía de Absorción Óptica Diferencial (DOAS por sus siglas en inglés). Durante las campañas de campo, las temperaturas de las fumarolas son monitoreadas mediante termopares y cámaras infrarrojas. Adicionalmente, se realiza un monitoreo hidrogeoquímico en cada uno de los seis volcanes monitoreados mediante mediciones de temperatura y de pH, y el análisis de composición (cloruros, sulfatos, etc.) de las aguas asociadas a los complejos volcánicos. Las muestras son tomadas de lagunas, manantiales o pozos cercanos a los volcanes y se procesan en las instalaciones del laboratorio del MARN.
3. Monitoreo de la deformación: desde 2006, la deformación del suelo ha sido monitoreada usando es-

taciones GPS. Actualmente, hay 5 estaciones GPS permanentes en los volcanes San Salvador y San Miguel. Este seguimiento es complementado con campañas de medición utilizando GPS móviles en posiciones fijas durante una crisis o si se necesita alguna información adicional.

4. Monitoreo visual: se realizan observaciones de la morfología del volcán durante campañas de campo. Esto incluye la observación del cono y el cráter, la descripción de fenómenos de inestabilidad de laderas y la medición de apertura de grietas dentro de los cráteres. Además, para todos los volcanes monitoreados existen redes de observadores locales capacitados, conformadas por residentes locales que brindan información acerca de cualquier cambio en la actividad y en la morfología volcánica. Asimismo, existen dos cámaras web localizadas en los volcanes Santa Ana y San Miguel, las que han estado transmitiendo en tiempo real desde 2006; una tercera cámara web estará funcionando próximamente en el volcán San Salvador.

Los datos de monitoreo volcánico se complementan con la recopilación de datos meteorológicos locales (por ejemplo, lluvia y viento). Todos los datos registrados son almacenados en las computadoras del DOA y están disponibles para fines de investigación bajo solicitud. No obstante, a futuro se requiere una mejor estructura de almacenamiento de datos para mejorar el sistema de monitoreo.

### 3 GESTIÓN DE LA AMENAZA VOLCÁNICA

El MARN ha desarrollado un protocolo de acción que sirve como herramienta y guía para una adecuada gestión de crisis durante las diferentes etapas de actividad volcánica, incluyendo la determinación de los productos informativos (*i.e.* boletines, informes, mensajes) que pueden ser empleados y la frecuencia con la que deben ser generados y actualizados. Este protocolo único incluye umbrales o líneas de base para los parámetros medidos (ej, RSAM y SO<sub>2</sub>), establecidos a partir del análisis estadístico y el monitoreo sistemático de todos los volcanes activos.

Es importante recalcar que existe una gran cantidad de trabajo que está siendo realizado por el personal del departamento de vulcanología en cooperación con universidades y otras instituciones, locales e internacionales, incluyendo la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la Universidad de Palermo (UNIPA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Estas colaboraciones están relacionadas con la gestión de amenazas y se enfocan principalmente en el desarrollo de mapas de amenazas y estudios vulcanológicos enfocados en la reconstrucción de la historia eruptiva de los principales volcanes activos.

**Tabla 2:** Estación/Equipo por técnica de monitoreo para los volcanes activos monitoreados de El Salvador. A = acelerógrafo; BB = banda ancha, DOAS = espectroscopia de absorción óptica diferencial; MG = multiGas; SP = periodo corto; WC = cámara web. Estaciones sísmicas, DOAS, WC y GPS son permanentes, las mediciones hidrogeológicas se realizan durante las campañas de campo (●).

Técnicas de Monitoreo	Santa Ana	Izalco	San Salvador	Ilopango Caldera	San Vicente	San Miguel
Sísmica	1 BB 3 SP	-	7 A 7 SP	1 A 3 SP	1 A 3 SP	1 BB 4 SP
Geoquímica de gas	1 DOAS MG	- MG	- MG	- MG	- MG	1 DOAS MG
Hidrogeoquímica	●	●	●	●	●	●
Visual	1 WC	-	-	-	-	1 WC
GPS	-	-	3	-	-	2

Existen mapas de amenaza volcánica para cuatro de los seis volcanes activos: volcán Santa Ana, volcán San Salvador, volcán San Vicente y volcán San Miguel. En la década de 1990, el CIG—parte del Ministerio de Obras Públicas (MOP)—estuvo a cargo de elaborar los primeros mapas de amenaza volcánica en El Salvador [Jimenez et al. 2018]. Posteriormente, el USGS elaboró mapas de amenazas para los volcanes San Miguel, San Salvador y San Vicente [Major et al. 2001a; b; c]. Más recientemente, se han elaborado mapas completos para el volcán San Miguel por Escobar et al. [2004], para el volcán Santa Ana por Ferrés et al. [2004] y para el volcán San Salvador por Ferrés et al. [2013] y Ferrés [2014], utilizando los *software* ASHFALL [Hurst 1994], BALLISTIC [Alatorre-Ibargüengoitia 2003; Alatorre-Ibargüengoitia y Delgado-Granados 2006], TITAN 2D [Pitman et al. 2003; GMFG 2007], y FLOW 3D [Malin y Sheridan 1982].

La Figura 3 muestra algunos de los mapas de amenaza disponibles. Estos mapas se construyen ya sea combinando varias amenazas (Figura 3A) o mostrando específicamente una amenaza individual a diferente escala (Figura 3B–D). Algunos de ellos muestran escenarios generales para toda la actividad volcánica, mientras que otros muestran las áreas que pueden verse afectadas por una amenaza individual. Existen mapas de amenaza para flujos de lava, flujos piroclásticos (Figura 3A, C), lahares y caída de balísticos (Figura 3B, D). Algunos de ellos fueron creados para diferentes escenarios (posibilidad de ocurrencia) de acuerdo con la actividad previa y utilizando un enfoque determinista. Actualmente se están preparando otros mapas de amenazas para los volcanes Santa Ana, San Salvador y San Miguel utilizando enfoques probabilísticos [Jimenez et al. 2018]. Todos los mapas oficiales de amenazas volcánicas se encuentran en la página web oficial\*. De acuerdo con la clasificación del nivel de riesgo volcánico, luego de una evaluación de factores de amenaza y exposición, los volcanes San Salvador y Santa Ana representan un nivel de riesgo muy alto, mientras que para la caldera Ilopango y el volcán San Miguel el nivel de riesgo es

alto [MARN 2019a].

#### 4 DIFUSIÓN Y ALCANCE DE LA INFORMACIÓN

La comunicación de la actividad volcánica se realiza a través de informes mensuales (o diarios si es necesario) que se transmiten vía fax y radio a Protección Civil y al Sistema Nacional de Emergencias. Esta información también es publicada en el sitio web del MARN<sup>†</sup> y en las cuentas de redes sociales del MARN<sup>‡§</sup>.

La transmisión en vivo desde las cámaras web de los volcanes San Miguel y Santa Ana (los volcanes más activos de El Salvador) está disponible en YouTube<sup>¶</sup>. La comunicación constante con las redes de observadores locales es en la actualidad la estrategia de comunicación más práctica y útil, permitiendo la rápida diseminación de información a personas que podrían verse potencialmente amenazadas. Además, se realizan sesiones de capacitación periódicas para los habitantes de los pueblos y ciudades bajo amenaza volcánica. También se efectúan talleres donde se muestran infografías y mapas de amenaza, y se capacita a las redes de observadores locales como parte importante de los Sistemas de Alerta Temprana (SAT).

El SAT puede definirse como el conjunto de procedimientos e instrumentos mediante los cuales se monitorea una amenaza o evento adverso (natural o antropogénico) de carácter previsible, y a través del cual se recolectan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos temporales así como sus posibles efectos. De acuerdo con la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres [Wiltshire 2006], un SAT incluye cuatro elementos: (1) conocimiento de riesgos y mapas de amenazas disponibles, (2) monitoreo y pronóstico de eventos inminentes, (3) procesamiento de datos y diseminación de alertas comprensibles a las autoridades políticas y público general, y (4) capacidad de respuesta adecuada y oportuna a tales alertas. En este punto, las

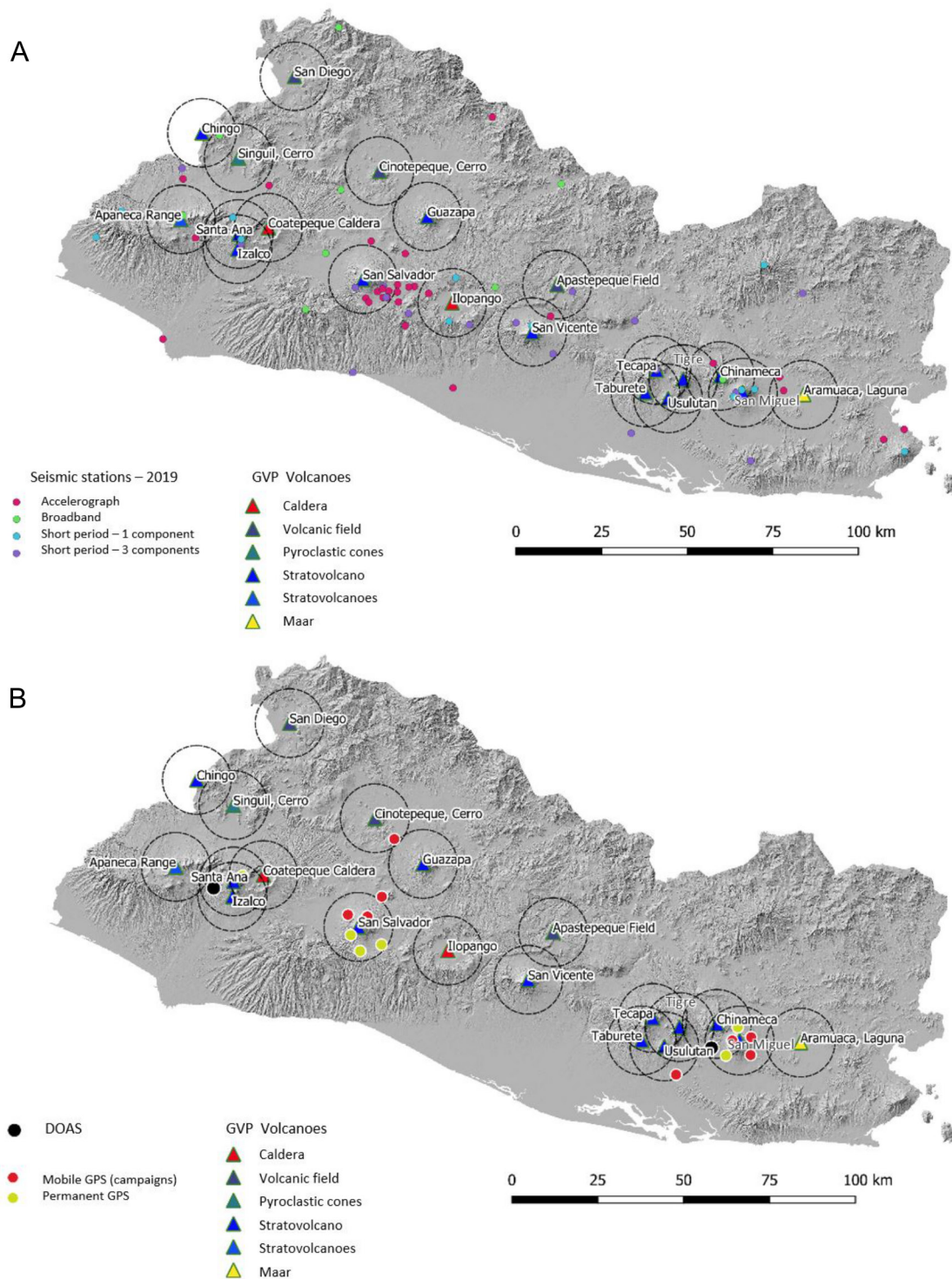
\*<http://www.snet.gob.sv/ver/vulcanologia/amenaza/>

<sup>†</sup>[www.marn.gob.sv](http://www.marn.gob.sv)

<sup>‡</sup><https://www.facebook.com/MedioAmbienteSLV/>

<sup>§</sup><https://twitter.com/MedioAmbienteSV>

<sup>¶</sup><https://www.youtube.com/c/MARNsv/videos>

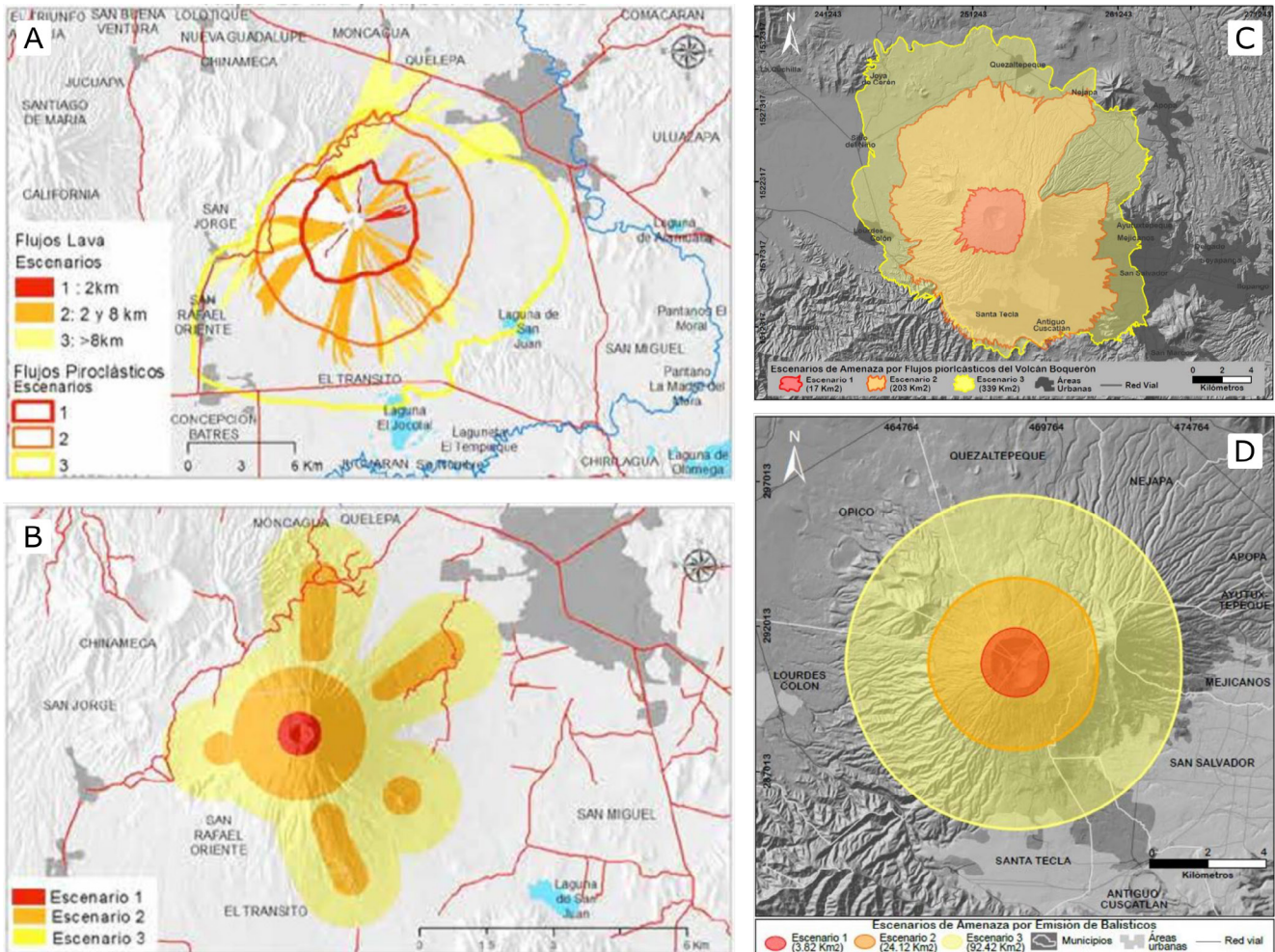


**Figura 2:** Mapas de la red de monitoreo. [A] Estaciones sísmicas, [B] DOAS y estaciones GPS [MARN 2019a].

redes de observadores locales juegan un rol importante al usar sus conocimientos sobre el volcán para identificar cambios en la actividad volcánica y al establecer comunicación directa con las instituciones oficiales locales y nacionales (incluyendo protección civil, municipalidades y el ejército) y otros residentes en zonas de riesgo. En resumen, los centros volcánicos se monitorean utilizando instrumentos geofísicos y geoquímicos,

se analizan los datos y se establece comunicación con la dirección de protección civil y con las redes de observadores locales para determinar las medidas preventivas a seguir y así evitar, en tanto sea posible, tragedias.

En 2016 se implementó un SAT como respuesta a la erupción del volcán San Miguel. Para emitir una alerta temprana, el observatorio, como entidad científica a cargo del monitoreo de amenazas, trabaja en estrecha



**Figura 3:** Ejemplos de mapas de amenaza para volcanes salvadoreños según tres diferentes escenarios: (erupciones pequeñas con alta probabilidad en color rojo, erupciones moderadas con probabilidad intermedia en color naranja, y grandes erupciones con probabilidad baja en color amarillo). [A] Mapa de amenaza por flujos de lava y flujos piroclásticos para el volcán de San Miguel [Escobar et al. 2004]; [B] Mapa de amenaza por emisión de balísticos para el volcán de San Miguel [Escobar et al. 2004]. [C] Mapa de amenaza por flujos piroclásticos para el volcán de San Salvador (también llamado Volcán Boquerón como en la figura [Ferrés 2014]). [D] Mapa de amenaza por emisión de balísticos para el volcán de San Salvador [Ferrés 2014].

colaboración con la Dirección General de Protección Civil, quien es responsable de las alertas nacionales y del manejo de crisis. Actualmente se está trabajando en un SAT para el volcán Santa Ana.

## 5 NECESIDADES, RETOS, Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El objetivo de la DOA siempre será mejorar e incrementar la cobertura instrumental en áreas volcánicamente activas, pero también mantener y mejorar la capacidad del personal técnico con respecto a nuevas técnicas y/o tecnologías.

Para cumplir con lo establecido en la reciente evaluación preliminar de amenazas volcánicas donde se prioriza el desarrollo del monitoreo, es necesario incrementar las actividades de monitoreo en volcanes de muy al-

to y alto riesgo. En cuanto a la cantidad de instrumentación requerida para alcanzar un nivel óptimo de monitoreo de los volcanes San Salvador, Santa Ana, San Miguel e Ilopango, es necesario adquirir más instrumentos sísmicos, geodésicos e hidrológicos [MARN 2019a].

Otras necesidades y desafíos que deben abordarse a corto y largo plazo incluyen:

- Generación de mapas de amenazas para los volcanes de San Vicente, Tecapa, Izalco y las calderas de Coatepeque e Ilopango, y actualización de los mapas de amenazas actuales mediante el uso de un enfoque probabilístico. Actualmente se están preparando mapas de amenaza para los volcanes de Santa Ana, San Salvador y San Miguel.
- Difusión de mapas de amenazas a la población y capacitación del público en su interpretación.

- Construcción de árboles de eventos probabilísticos para cada volcán en base a datos disponibles.
- Desarrollo de Sistemas de Alerta Temprana en los volcanes San Salvador y Santa Ana.
- Conversión rigurosa de mapas de amenaza volcánica a mapas de riesgo volcánico para comprender el nivel de riesgo de las áreas cercanas a los volcanes.
- Fortalecimiento de la evaluación de las amenazas volcánicas para determinar mejor cómo pueden ser implementados nuevos instrumentos y técnicas.
- Realización de estudios de vulcanología física de los depósitos de erupciones previas para estimar frecuencia, volúmenes y geocronología de eventos eruptivos en el pasado geológico de El Salvador.
- Fortalecimiento de la red de monitoreo volcánico existente y desarrollo de nuevas capacidades de monitoreo agregando más instrumentos e incorporando nuevas tecnologías [MARN 2019a].
- Finalmente, identificar las amenazas volcánicas en tiempo real para facilitar la emisión de una alerta temprana con el objetivo de proteger a la población en mayor riesgo.

### AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis compañeros de trabajo del observatorio de amenazas y recursos naturales, especialmente del área de vulcanología por proveer información y documentos importantes para la elaboración de este artículo.

### CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Rodolfo Castro y Eduardo Gutiérrez escribieron el manuscrito.

### DISPONIBILIDAD DE DATOS

La mayoría de la información presentada en este artículo, así como otro tipo de información relacionada o complementaria, se encuentra disponible en los sitios web oficiales del ministerio de medio ambiente y se permite la reproducción total o parcial de la información, agradeciendo de antemano consignar la fuente. Así como también en los documentos citados en las referencias.

### DERECHOS DE LOS AUTORES

© Autor(es) 2021. Este artículo se distribuye bajo los términos de la [Creative Commons Attribution 4.0 Licencia internacional](#), 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

- Alatorre-Ibargüengoitia, M. A. (2003). "Física de proyectiles balísticos volcánicos y delimitación de zonas de peligro por su impacto". Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Alatorre-Ibargüengoitia, M. A. y H. Delgado-Granados (2006). "Experimental determination of drag coefficient for volcanic materials: Calibration and application of a model to Popocatepetl volcano (Mexico) ballistic projectiles". *Geophysical Research Letters* 33 (11). DOI: [10.1029/2006gl026195](#).
- Bosse, H., W. Lorenz, A. Merino, A. Mihm, K. Rode, M. Schmidt-Thomé, H. Weber y G. Wiesemann (1976). *Carta Geológica de la República de El Salvador (Centroamérica)*. Inf. téc. Hannover. [Scale 1: 100,000].
- Escobar, C. D., D. Ferrés, C. Pullinger, H. Delgado-Granados, I. A. Farraz y M. A. Alatorre-Ibargüengoitia (2004). *Mapa de escenarios de amenaza del Volcán de San Miguel o Chaparrastique*. Inf. téc. San Salvador. [Scale 1: 200,000].
- Ferrés, D. (2014). "Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador)". Tesis doct. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ferrés, D., H. Delgado-Granados, R. E. Gutiérrez, I. A. Farraz, E. W. Hernández, C. R. Pullinger y C. D. Escobar (2013). "Explosive volcanic history and hazard zonation maps of Boquerón Volcano (San Salvador volcanic complex, El Salvador)". *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Ed. por W. I. Rose, J. L. Palma, H. Delgado-Granados y N. Varley. Geological Society of America, págs. 201-230. DOI: [10.1130/2013.2498\(12\)](#).
- Ferrés, D., C. D. Escobar, C. Pullinger, J. Vallance y J. Griswold (2004). *Mapa de Escenarios de Amenaza del Volcán de Santa Ana*. Inf. téc. San Salvador. [Scale 1: 200,000].
- Geophysical Mass Flow Group [GMFG] (2007). *Titan2D User Guide*. Inf. téc. New York.
- Global Volcanism Program (2020). "Holocene Volcano List". *Volcanoes of the World, v. 4.9.1*. Ed. por E. Venzke. Smithsonian National Museum

- of Natural History. DOI: 10.5479/si.GVP.VOTW4-2013.
- (2013). *Volcanoes of the World, v. 4.7.1. Venzke, E (ed.). Smithsonian Institution*. [Web; Downloaded 07-02-2021].
- Hotovec-Ellis, A. y C. Jeffries (2016). “Near real-time detection, clustering, and analysis of repeating earthquakes: Application to Mount St. Helens and Redoubt volcanoes”. *Seismological Society of America Annual Meeting*. Reno.
- Hurst, A. W. (1994). ASHFALL—a computer program for estimating volcanic ash fallout. Inf. téc. Wellington, pág. 22.
- Jimenez, D., L. Becerril, S. Bartolini y J. Martí Mollist (2018). “Assessing spatial and temporal probabilities in San Miguel Volcano, El Salvador”. (*Geo3Bcn*) *Comunicaciones congresos*.
- Kattan, C., L. Menjivar, G. Molina, Y. Peñate, A. Estrada, I. Moran, T. Chávez, B. Arriola, D. Cruz, R. Vides, C. Canales, M. Diaz, E. Gutierrez, D. Hernández, G. Marroquín, F. Gavidia, L. García, P. Ayala, R. Cerón, A. Erazo, H. Beltrán, C. Rivas, G. Barrera y A. Cañas (2017). *Informe Nacional del Estado de los Riesgos y Vulnerabilidades, San Salvador*. San Salvador.
- Major, J., S. Schilling, C. Pullinger, C. Escobar, C. Chesner y M. Howell (2001a). *Lahar-hazard zonation for San Miguel volcano, El Salvador*. DOI: 10.3133/ofr01395.
- Major, J., S. Schilling, C. Pullinger, C. Escobar y M. Howell (2001b). *Volcano-hazard zonation for San Vicente volcano, El Salvador*. DOI: 10.3133/ofr01367.
- Major, J., S. Schilling, D. Sofield, C. Escobar y C. Pullinger (2001c). *Volcano hazards in the San Salvador region, El Salvador*. DOI: 10.3133/ofr01366.
- Malin, M. C. y M. F. Sheridan (1982). “Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges”. *Science* 217 (4560), págs. 637-640. DOI: 10.1126/science.217.4560.637.
- Meyer-Abich, H. (1956). “Los Volcanes Activos De Guatemala Y El Salvador (America Central)”. *Anales del Servicio Geológico Nacional* 3.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales [MARN] (2019a). *Evaluación preliminar de Amenaza Volcánica en El Salvador y Análisis de Brechas “TAGA”, San Salvador*.
- (2019b). *Monitoreo volcánico*. URL: <http://www.marn.gob.sv/monitoreo-volcanico/> (visitado 22-11-2020).
- Pedrazzi, D., I. Sunye-Puchol, G. Aguirre-Díaz, A. Costa, V. C. Smith, M. Poret, P. Dávila-Harris, D. P. Miggins, W. Hernández y E. Gutiérrez (2019). “The Ilopango Tierra Blanca Joven (TBJ) eruption, El Salvador: Volcano-stratigraphy and physical characterization of the major Holocene event of Central America”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 377, págs. 81-102. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2019.03.006.
- Pitman, E. B., C. C. Nichita, A. Patra, A. Bauer, M. Sheridan y M. Bursik (2003). “Computing granular avalanches and landslides”. *Physics of Fluids* 15 (12), págs. 3638-3646. DOI: 10.1063/1.1614253.
- Siebert, L., T. Simkin y P. Kimberly (2011). *Volcanoes of the World*. Univ of California Press. ISBN: 9780520268777.
- Wiltshire, A. (2006). “Developing early warning systems: a checklist”. *Proc. 3rd Int. Conf. Early Warning (EWC)*. ISDR/ Federal Foreign Office, págs. 27-19.