

Monitoreo de volcanes en México

Ramón Espinasa-Pereña^{*†α}, Raúl Arámbula^β, Silvia Ramos^γ, Katrin Sieron^δ, Lucia Capra^ε,
Ariadna Hernández-Oscay^α, Miguel Alatorre^γ, Francisco Córdoba Montiel^δ

^α Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, México.

^β Centro Universitario de Estudios en Vulcanología, Universidad de Colima, Colima, México.

^γ Centro de Monitoreo Vulcanológico y Sismológico de Chiapas, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas,
Tuxtla Gutiérrez, México.

^δ Observatorio Sismológico y Vulcanológico, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

^ε Centro de Geociencias, campus Juriquilla, UNAM, Querétaro, México.

RESUMEN

México tiene al menos 46 centros volcánicos que podrían considerarse activos o potencialmente activos (incluyendo campos volcánicos monogenéticos). Debido al carácter federal del país, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la entidad responsable de monitorear los fenómenos naturales. Individualmente, algunos estados mexicanos también monitorean los volcanes activos dentro de su territorio, a través de las universidades locales, por lo que existen observatorios específicos para Colima, Citlaltépetl (Pico de Orizaba), San Martín Tuxtla, El Chichón y Tacaná; todos estos considerados entre los volcanes de mayor riesgo relativo del país. Se proporcionan detalles sobre instrumentación, adquisición de datos, gestión de riesgos y difusión y divulgación de información para cada volcán y observatorio. La creación de un Servicio Vulcanológico Nacional, con sede en CENAPRED, y en cooperación plena con los observatorios universitarios locales, ayudaría a concentrar todos los datos de monitoreo e información oficial sobre los volcanes activos en una sola institución, así como a adquirir y asignar recursos, de acuerdo con el riesgo relativo que representan los diferentes volcanes.

This article is available in English at: <https://doi.org/10.30909/vol.04.S1.223246> [PDF EN].

1 INTRODUCCIÓN

México presenta una geología compleja, que comprende complejos metamórficos precámbricos, cinturones orogénicos plegados mesozoicos y depósitos continentales y volcánicos terciarios y cuaternarios [Morán 1985]. Esta complejidad es consecuencia de un intrincado escenario tectónico. México está ubicado en el extremo sur de la placa tectónica de América del Norte, donde las placas de Cocos y Rivera se subducen (Figura 1), creando el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (TMVB, por sus siglas en inglés) que se extiende a lo largo del país desde el oeste hasta el este. Los volcanes más activos y peligrosos del país se encuentran a lo largo de esta cordillera [Espinasa-Pereña 2018]. En la costa noroeste de México, la cresta del Pacífico oriental separa la península de Baja California de América del Norte, y existen numerosos volcanes en este entorno de expansión tectónica. Además, a lo largo de la Sierra Madre oriental, una provincia volcánica alcalina contiene algunos campos monogenéticos recientes y el volcán San Martín Tuxtla. En el extremo sur de México, la subducción de la placa de Cocos debajo de la placa del Caribe ha creado los arcos volcánicos Chiapaneco y Centroamericano, donde se encuentran los volcanes El Chichón y Tacaná, respectivamente [Macías et al. 2008; 2015].

Un estudio reciente de Espinasa-Pereña [2018] concluyó que 46 centros volcánicos en México podrían considerarse activos o potencialmente activos. Entre ellos, hay 26 estratovolcanes del Holoceno y 15 campos monogenéticos que han producido al menos una erupción en los últimos 10000 años. La lista se completa con tres calderas, que han entrado en erupción en los últimos 100000 años (una de ellas, Los Hornos, estuvo activa en el Holoceno), y dos volcanes submarinos en la cresta del Pacífico Oriental. El volcán Salton Buttes en los Estados Unidos de América y los volcanes Tajumulco, Santiaguito, Fuego y Pacaya en Guatemala también representan un riesgo para la población y el territorio de México, principalmente debido al potencial de caída de ceniza.

Por lo menos la mitad de la población de México vive a menos de 100 km de un volcán activo, principalmente debido al clima benigno y los suelos fértiles del TMVB, donde la población es más densa. Con 60 millones de personas en riesgo, México ocupa el cuarto lugar entre los países con el mayor número de personas expuestas a peligros volcánicos, después de Indonesia, Filipinas y Japón [Brown et al. 2015].

Debido al gobierno federal del país, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) es la entidad jurídica responsable del monitoreo de los fenómenos naturales que pudieran poner en peligro la vida y propiedad de la población, incluidas las erupciones vol-

* Autor de correspondencia: respinasa@yahoo.com.mx

† Ahora: Instituto de Geología, UNAM, México, México.

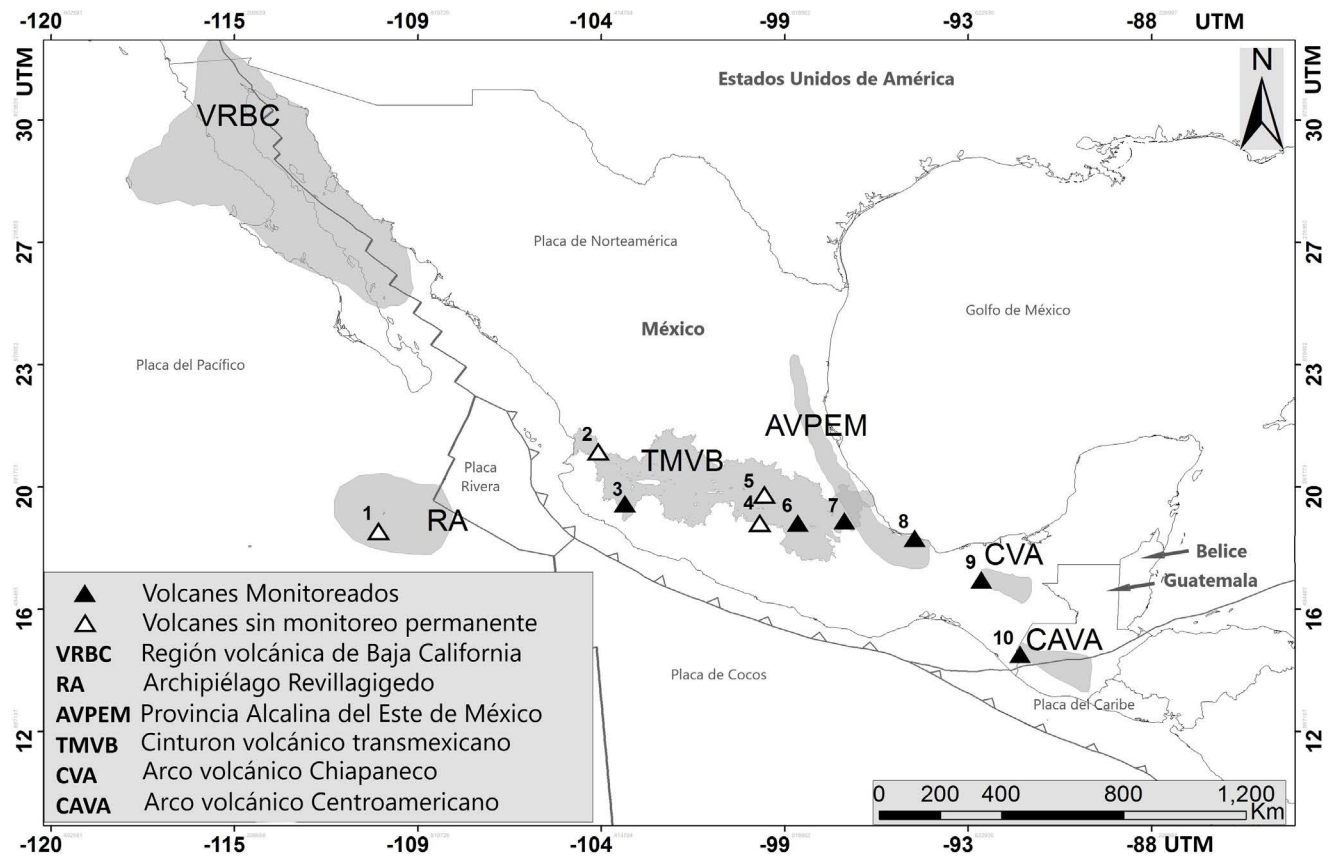


Figura 1: Ambiente tectónico de México y las distintas provincias volcánicas. Volcanes mencionados en el texto: 1) Evermann, 2) Ceberuco, 3) Colima, 4) Nevado Toluca, 5) Jocotitlán, 6) Popocatepetl, 7) Citlaltépetl, 8) San Martín Tuxtla, 9) Chichón and 10) Tacaná.

cánicas. Sin embargo, individualmente, los estados con volcanes activos dentro de su territorio también realizan operaciones de monitoreo, generalmente a través de los esfuerzos de una pequeña comunidad de geocientíficos en las universidades locales; existen observatorios locales para el volcán Colima en la frontera del estado Colima-Jalisco, Citlaltépetl y San Martín Tuxtla en Veracruz, y El Chichón y Tacaná, en Chiapas.

1.1 Breve historia del monitoreo de volcanes en México

Los primeros observatorios volcánicos en México fueron establecidos en 1893 en Zapotlán, Jalisco, y en 1895 en Colima, Colima, por los padres Arreola y Díaz, quienes realizaron observaciones sistemáticas de la actividad del volcán Colima entre 1893 y 1905 [Bretón-González et al. 2002]. Entre 1943 y 1952, el Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) estableció un observatorio cerca de Angahuan, Michoacán, para estudiar la actividad del volcán Parícutín [Lühr et al. 1993].

Entre marzo y abril de 1982, y casi sin previo aviso, el volcán El Chichón (también conocido como Chichonal), en Chiapas, generó una erupción cataclísmica que

es reconocida como el desastre volcánico más mortífero en la historia de México. La erupción mató a unas 2000 personas, desplazó a varios miles y provocó fuertes impactos sociales, económicos y ambientales. Tres años después, en septiembre de 1985, un gran terremoto de Mw8.1 golpeó el país, provocando el colapso de más de 300 edificios en la Ciudad de México y un estimado de 20000 víctimas. Estos desastres fueron los catalizadores para el establecimiento del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC) en 1988. Gracias al apoyo de la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA, por sus siglas en inglés), se creó el CENAPRED como la rama técnico-científica del SINAPROC, a cargo de estudiar los fenómenos que provocan desastres y proponer políticas públicas para prevenir y mitigar sus efectos.

El volcán Colima ha sido monitoreado por la Universidad de Colima desde 1989. El monitoreo comenzó con 3 sismómetros de corto período que transmitían las señales al Campus Central en la ciudad de Colima. Actualmente, el Centro Universitario de Estudios en Vulcanología (CUEV) es el responsable del monitoreo. Los datos adquiridos son compartidos con las agencias de Protección Civil de los estados de Jalisco y Colima, y con CENAPRED.

Luego de casi 70 años de inactividad, en 1994 el vol-

cán Popocatepetl, ubicado a 60 km de las afueras de la Ciudad de México, comenzó a mostrar renovados signos de actividad. En aquel entonces existía una sola estación sísmica cerca del volcán, en Tlamacas (Estado de México), operada por el Servicio Sismológico Nacional (SSN). Tan pronto como se evidenció que el volcán estaba despertando, se instalaron las primeras estaciones de monitoreo, con telemetría al CENAPRED, gracias a la ayuda y la donación de equipos por parte del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) y su Programa de Asistencia para Desastres Volcánicos (VDAP, por sus siglas en inglés). Por ello, el CENAPRED asumió la responsabilidad de monitorear y alertar a la población en caso de una inminente erupción.

Motivado por actividad freática en 1986, el SSN instaló en el volcán Tacaná una red sísmica en 1998. En 2003, con la creación del Centro de Monitoreo Volcanológico y Sismológico (CMVS), auspiciado por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH), comenzó oficialmente el monitoreo de volcanes en Chiapas.

El Observatorio Sismológico y Volcanológico (OSV) del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana fue creado en 2014, cuando se instaló la red sísmica del estado de Veracruz. Esto fue en respuesta a una multitud de eventos históricos, incluidas las erupciones del volcán Citlaltépetl (también conocido como Pico de Orizaba) en los siglos XVII y XVIII, las erupciones del volcán San Martín en 1793 y el terremoto poco profundo de 1920 (Mw 6.4), que provocó eventos de remoción en masa a gran escala en las áreas montañosas al norte del volcán Citlaltépetl y causaron casi 700 muertes. El OSV también se estableció en respuesta a desastres recientes relacionados con lahares, provocados por la lluvia y otros eventos de flujo masivo en 2003 y 2012 en el volcán Citlaltépetl [Rodríguez et al. 2006; Morales Martínez et al. 2016].

1.2 ¿Qué volcanes se monitorean actualmente en México?

Al 2020, hay 6 volcanes que están siendo constantemente monitoreados en México: Popocatepetl, Colima, Citlaltépetl (Pico de Orizaba), San Martín Tuxtla, Tacaná y El Chichón.

El Popocatepetl es considerado el volcán de mayor riesgo potencial, debido a su ubicación a 60 km de las afueras de la Ciudad de México y al hecho de que más de 25 millones de personas viven dentro de un radio de 100 km desde su cráter. Se han registrado numerosas erupciones históricas, y el volcán ha estado continuamente activo durante los últimos 25 años, con actividad efusiva frecuente, que crea domos de lava dentro del cráter (Figura 2), seguidas de explosiones vulcanianas que causan la posterior destrucción de los domos [Espinasa-Pereña 2012]. El Popocatepetl es monitoreado continuamente por CENAPRED.

Colima es el volcán más activo de México. En los últimos 430 años, ha tenido alrededor de 50 erupciones significativas, incluyendo eventos de tipo subpliniano a pliniano (en 1818 y 1913, de VEI 4), y frecuentes eventos de crecimiento de domos y posterior colapso, asociados a explosiones vulcanianas y corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés) [Medina-Martínez 1983; Bretón-González et al. 2002]. Durante la erupción pliniana de 1913, las PDC viajaron hasta 15 km desde el cráter [Capra et al. 2015, y referencias en el mismo]. Hoy en día, flujos similares representarían un alto riesgo para las comunidades cercanas al volcán, donde viven más de 10,000 personas. En julio de 2015, dos colapsos asociados con el crecimiento del domo generaron PDC con un alcance inesperado de 10.5 km, lo que la convirtió en la erupción más grande desde 1913 [Reyes-Dávila et al. 2016]. Por lo general, una fase eruptiva del volcán de Colima comienza con el crecimiento del domo de lava, acompañado de la ocurrencia de flujos piroclásticos y flujos de lava (Figura 2), y finalmente explosiones que conducen a la destrucción del domo de lava [Arámbula-Mendoza et al. 2019]. Desde 2011, se implementó el monitoreo sistemático de lahares, en colaboración con el Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Querétaro.

El Citlaltépetl, también llamado Pico de Orizaba, es el volcán más alto de América del Norte y el tercer volcán más activo de México, con numerosas erupciones efusivas y explosivas durante los siglos XVI, XVII y XVIII. Actualmente tiene pequeñas fumarolas activas cerca del cráter de la cumbre. Casi un millón de personas, distribuidas principalmente en las ciudades de Orizaba, Nogales y Ciudad Mendoza, al sur del volcán, y Ciudad Serdán al oeste, son vulnerables en caso de que el volcán se reactive (Figura 2).

El volcán San Martín Tuxtla, ubicado al sureste de Veracruz, está rodeado por un gran campo monogenético joven, que entró en erupción por última vez en 1793. Se encuentra a 90 km de la ciudad de Coatzacoalcos y podría afectar a 160,000 personas, principalmente en las ciudades de San Andrés Tuxtla y Santiago Tuxtla. En la actualidad, los volcanes Citlaltépetl y San Martín Tuxtla están siendo monitoreados continuamente por la OSV (Figura 2).

El volcán El Chichón, tiene un vigoroso registro eruptivo durante el Holoceno, con al menos 12 erupciones explosivas en los últimos 8,000 años [Scolamacchia y Capra 2015]. Sin embargo, era un volcán casi desconocido hasta la erupción cataclísmica de marzo-abril de 1982 (Figura 2). Actualmente, es monitoreado por el CMVS.

El Tacaná, situado en la frontera con Guatemala, es el volcán activo más occidental del Arco Volcánico Centroamericano. Durante el Holoceno produjo al menos cuatro erupciones subplinianas a plinianas y nueve erupciones explosivas adicionales, de las cuales la más reciente ocurrió hace unos 150 años [Macías et al. 2015]. Las erupciones freáticas en 1949 y 1986, re-

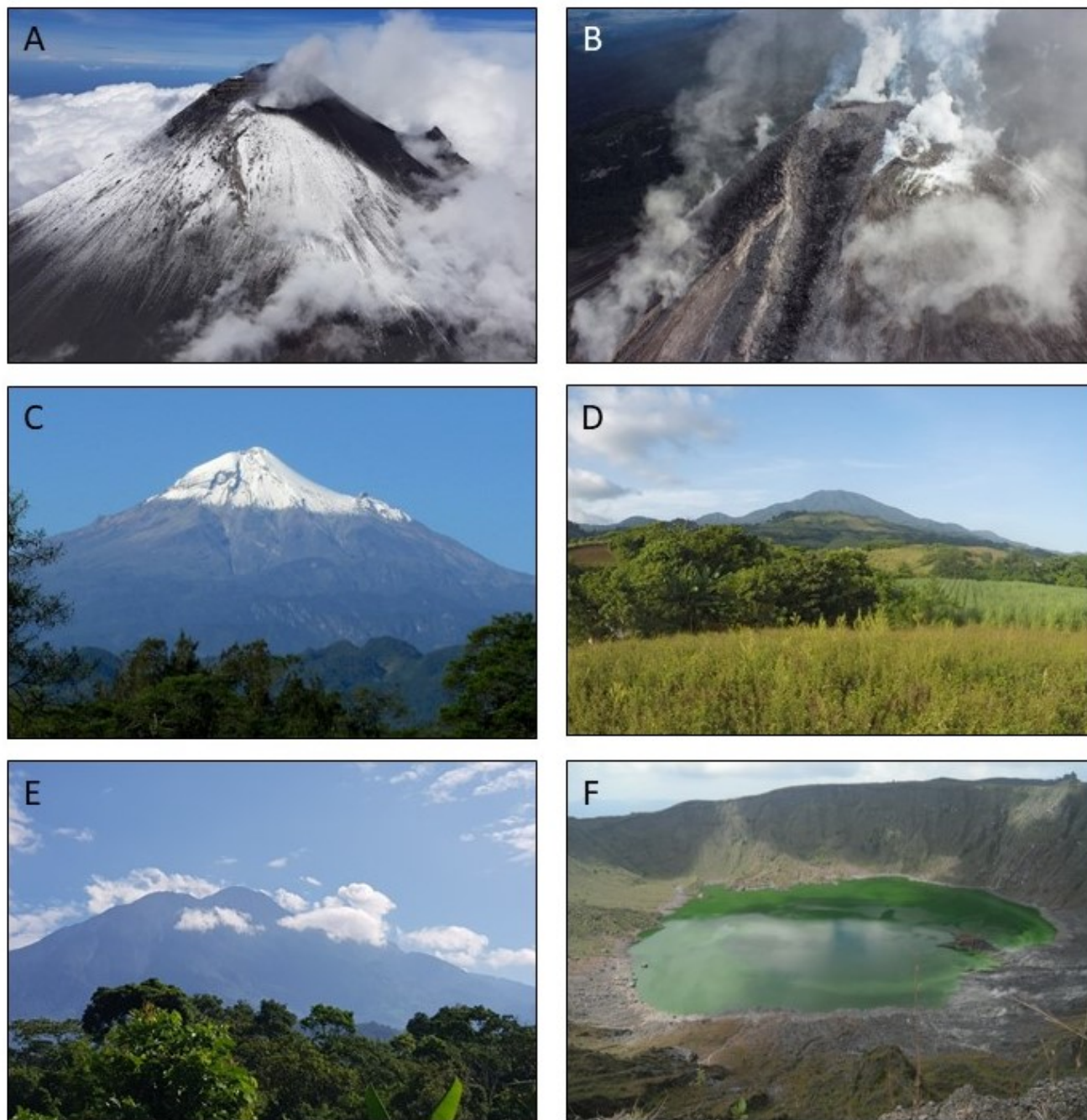


Figura 2: Principales volcanes monitoreados en México. [A] Popocatepetl visto desde el Este, mostrando cenizas y depósitos balísticos sobre nieve reciente (foto: Ramón Espinasa-Pereña, Julio 2019). [B] Colima, mostrando uno de sus derrames de lava de 2015 saliendo del cráter (foto: Raúl Arámbula, Julio 2015). [C] Citlaltépetl (Pico de Orizaba) elevándose sobre la llanura costera (foto: Katrin Sieron, Octubre 2018). [D] San Martín Tuxtla y varios de los conos adventicios que forman el campo volcánico Los Tuxtlas (foto: Katrin Sieron, April 2010). [E] Tacaná sobre la planicie de Tapachula en la frontera con Guatemala (foto: Ramón Espinasa-Pereña, Agosto 2018). [F] Cráter del Chichón que quedó tras la erupción de 1982, con su lago de agua sulfurosa (foto: Miguel Alatorre, Octubre 2014).

cordaron la amenaza que representa para las más de 400,000 personas que viven en las cercanías del volcán (la ciudad fronteriza de Tapachula), en la región más densamente poblada de Chiapas y la cual se caracteriza por su importante actividad económica (Figura 2).

2 ¿CÓMO MONITOREAMOS ESTOS VOLCANES?

CENAPRED está a cargo de la red de monitoreo del volcán Popocatepetl. Adicionalmente, realiza muestreos y análisis anuales de agua de manantiales y/o lagos en los volcanes Tacaná, El Chichón, San Martín, Citlaltépetl y Ceboruco. Desde el 2015, también recibe los datos de la red de monitoreo de Colima, por convenio con el CUEV, y ha cooperado con ellos en la adquisición e instalación de equipos de monitoreo. Los datos sísmicos de las estaciones cercanas a los volcanes Citlaltépetl y San Martín se transmiten vía internet (software Earthworm) al OSV y CENAPRED. Las estaciones sísmicas de Tacaná pertenecen al SSN y sus señales se reciben tanto en el CMVS como en CENAPRED.

Además, en México también se monitorean otros centros volcánicos con menor actividad. En alianza con la Agencia de Protección Civil del Estado de México, el CENAPRED instaló sismómetros en los volcanes Nevado de Toluca y Jocotitlán, pero actualmente no se reciben señales por problemas de comunicación. El volcán Evermann, ubicado en la Isla Socorro (Estado de Colima), cuenta con dos estaciones sísmicas pertenecientes al SSN. El volcán Ceboruco, en Nayarit, posee una sola estación sísmica del SSN, ubicada a 9 km del cráter. También existen estaciones sísmicas del SSN ubicadas dentro o cerca de los campos volcánicos Michoacán-Guanajuato, Chichinautzin y Xalapa-Naolinco. Aunque no con fines de monitoreo volcánico, las calderas de La Primavera, Los Azufres (Michoacán) y Los Humeros (Puebla), así como los campos geotérmicos de Cerro Prieto y Tres Vírgenes (Baja California), también están instrumentados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), pero sus registros son confidenciales.

2.1 Volcán Popocatepetl (estados de México, Puebla y Morelos)

Existen diferentes tipos de equipos de monitoreo en tiempo real en el Popocatepetl (Figura 3, Tabla 1), incluyendo sismómetros, GPS, cámaras, estaciones meteorológicas, un inclinómetro y un sensor acústico. El personal del CENAPRED vinculado a las tareas de monitoreo consiste de un total de 22 personas (Tabla 2). Todos los datos recibidos y generados por la red de monitoreo del volcán Popocatepetl se almacenan de dos formas:

1. Base de datos Winston: un servidor de forma de onda que usa MySQL para consultar datos junto con el software Earthworm y que, a través de Java, se puede visualizar con el software Swarm (Winston, Earthworm y Swarm, son programas desarrollados

por el USGS). La base de datos Winston reside en un servidor que almacena 60 días de datos. Un segundo servidor Winston, con datos de los últimos 30 días, se utiliza para generar diferentes formatos (heligramas, espectrogramas, seisan, dmx y sac) a través del software Earthworm.

2. Base de datos histórica: Copia física de respaldo de 25 años de datos e imágenes sísmicas, en DVD, discos duros y un NAS recientemente integrado del formato nativo de los sensores sísmicos (gcf, msed). Las imágenes de la cámara se guardan como jpg. Los datos de deformación y gases se guardan en los servidores de adquisición y en un disco duro de respaldo.

Esta información se pone a disposición pública, mediante una carta de solicitud oficial al Director General del CENAPRED, especificando el tipo de datos y el período de tiempo requerido y el uso previsto. Los datos se entregan en formato nativo, por lo que el solicitante puede procesar los datos para los fines de su investigación. El CENAPRED solicita que cuando los resultados son publicados, se le dé el debido crédito.

2.2 Volcán de Colima (estados de Jalisco y Colima)

Para el monitoreo en tiempo real del volcán de Colima (Figura 3, Tabla 1), se utilizan sismómetros, cámaras, sensores acústicos, estaciones meteorológicas, GPS, inclinómetros y EDM. Los datos se almacenan en DVD y discos duros y pueden estar disponibles a pedido. El personal de monitoreo incluye nueve investigadores y siete técnicos (Tabla 2).

2.3 Volcanes Citlaltépetl y San Martín Tuxtla (estado de Veracruz)

Los datos sísmicos de la Red Veracruzana, que incluye ocho estaciones sísmicas de banda ancha ubicadas a lo largo del estado, más las estaciones cercanas a los volcanes Citlaltépetl y San Martín (Figura 3), se transmiten y comparten vía internet (software Earthworm) con el CENAPRED y el SSN. Los terremotos de pequeña magnitud se visualizan en el sitio web del Observatorio* (los terremotos de mayor magnitud son publicados por el SSN). Los datos se almacenan continuamente en discos duros del OSV y se pueden solicitar a través de SSN. También se han instalado dos cámaras en el Citlaltépetl.

Solo hay dos miembros permanentes del OSV, un sismólogo y un vulcanólogo, apoyados por estudiantes de diferentes disciplinas (Tabla 2).

*<http://www.uv.mx/osv>

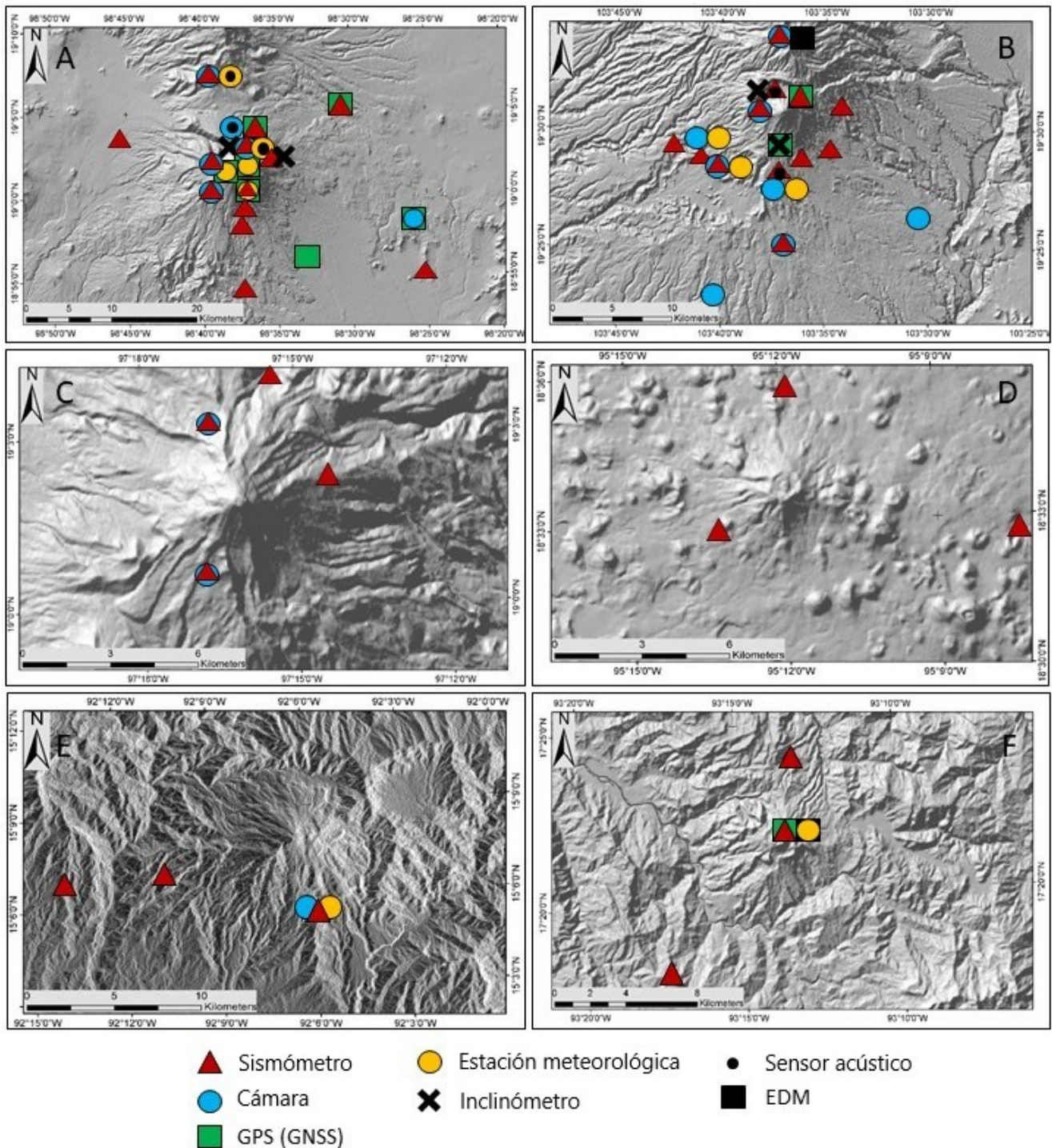


Figura 3: Estaciones de monitoreo en cada uno de los volcanes monitoreados permanentemente en México. [A] Popocatepetl; [B] Colima; [C] Citlaltépetl (Pico de Orizaba); [D] San Martin Tuxtla; [E] Tacaná, y [F] El Chichón. Los triángulos rojos son estaciones sísmicas, mientras que los triángulos azules son estaciones con sísmica y otros instrumentos de monitoreo (senso acústico, GPS, tiltmeter, EDM, Cámara y / o estación meteorológica).

2.4 Volcanes El Chichón y Tacaná (estado de Chiapas)

Las técnicas y equipos de monitoreo desplegados actualmente en los volcanes El Chichón y Tacaná por el CMVS y SSN, se presentan en la [Tabla 1](#) y [Figura 3](#), e incluyen sismómetros, GPS y EDM en El Chichón, sismó-

metros y una cámara en Tacaná. El personal permanente del CMVS incluye cuatro personas ([Tabla 2](#)), y realizan monitoreo sísmico, geoquímico, geodésico y visual. Todos los datos se almacenan en la UNICACH; los datos sísmicos se comparten con el CENAPRED y el SSN.

Desafortunadamente, para el monitoreo del volcán

Tabla 1: Equipo de monitoreo instalado en cada volcán.

Institución	Volcán	Instruments						
		Sismómetros	Sensores Acústicos	GPS	Inclinómetros	EDM	Cámara	Meteorológica
CENAPRED	Popocatepetl	16	1	7	2	-	9	5
CUEV	Colima	15	4	1	1	1	11	4
OSV	San Martín-Tuxtla	3	-	-	-	-	-	-
	Pico de Orizaba	3	-	-	-	-	2	3
CMVS	El Chichón	3	-	1	-	1	-	1
	Tacaná	4	-	-	-	-	1	1

Tabla 2: Staff dedicado al monitoreo volcánico.

Institución	Staff			
	Ejecutivos	Investigadores	Técnicos	Total
CENAPRED	3	8	11	22
CUEV	2	7	7	16
OSV	-	2	-	2
CMVS	1	2	1	4

Tacaná, aunque existen contactos entre el CENAPRED y los institutos guatemaltecos —el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) y la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED)—aún no se ha establecido una colaboración formal. Esto es desafortunado, ya que el edificio del Tacaná se extiende a ambos lados de la frontera entre ambos países, y los volcanes en Guatemala también representan un riesgo para la población y el territorio de México debido a la caída de cenizas.

3 GESTIÓN DEL PELIGRO VOLCÁNICO

3.1 Mapas de peligros

Los mapas de peligros de los volcanes mexicanos han sido elaborados principalmente por investigadores individuales, sin el apoyo directo de las instituciones que los monitorean. Sin embargo, la versión más reciente de los mapas de peligros del volcán Popocatepetl [Martin-Del Pozzo et al. 2016] fue financiada por un fondo especial del Ministerio del Interior para la prevención de desastres naturales (Fondo para la Prevención de Desastres Naturales, FOPREDEN).

El mapa oficial de amenazas del volcán Colima fue elaborado por investigadores del CUEV en 2003 [Navarro-Ochoa et al. 2003], y Protección Civil todavía lo utiliza. No obstante, con base en los escenarios eruptivos recientes y nuevos datos publicados [es decir, Cortés et al. 2010; Capra et al. 2015; Macorps et al. 2018], se está preparando una nueva versión del mapa, en cooperación con CENAPRED.

El mapa de peligros del volcán Citlaltépetl fue pu-

blicado por Sheridan et al. [2002] mientras que Sieron et al. [2014] publicaron mapas de escenarios eruptivos para el volcán San Martín.

El mapa de peligros publicado para el volcán El Chichón [Macías et al. 2008], que incluye los peligros asociados a PDC, lahares y caída de cenizas, ha sido complementado recientemente con un mapa de peligros por balísticos [Alatorre-Ibargüengoitia et al. 2016]. Aún no se ha publicado un mapa completo de peligros para el Tacaná, aunque se están haciendo esfuerzos para producir uno [por ejemplo, Vázquez et al. 2019a; b].

Tabla 3 incluye las referencias a los mapas que están disponibles para su descarga. También se han publicado mapas de peligros para otros volcanes, que actualmente no se monitorean de manera sistemática, como el Nevado de Toluca [Capra et al. 2008] y el Caboruco [Sieron et al. 2019].

Adicionalmente, la página web del CENAPRED brinda acceso al Atlas Nacional de Riesgos*, que incluye capas con mapas geológicos y escenarios de amenazas para los volcanes Caboruco, Citlaltépetl, Chichón, Colima, Jocotitlán, Malinche, Nevado de Toluca, Popocatepetl, San Martín Tuxtla, Tacaná, y Tres Vírgenes, así como una capa que identifica todos los campos volcánicos monogenéticos del Pleistoceno-Holoceno, y otro mapa que incluye la mayoría de los estratovolcanes del Holoceno en México.

*<http://www.atlasonacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>

Tabla 3: Enlaces a mapas de peligros de volcanes mexicanos.

Volcano	Reference
Popocatepetl	Martin-Del Pozzo et al. [2016]^a
Popocatepetl ^b	Martin-Del Pozzo et al. [2016]^c
Colima	Navarro-Ochoa et al. [2003]^d
Citlaltépetl	Sheridan et al. [2002]^e
San Martín Tuxtla ^f	Sieron et al. [2014]^g
Chichón	Macías et al. [2008]
Chichón ^h	Alatorre-Ibargüengoitia et al. [2016]
Nevado Toluca	Capra et al. [2008]
Ceboruco	Sieron et al. [2019]

^a <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLCNPOPCATPETL.PDF>

^b nahuatl language

^c [http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLCNPOPCATPETL\(ENNHUALTLDEATLIXTAC\).PDF](http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/357-CARTELMAPASDEPELIGROSDDELVOLCNPOPCATPETL(ENNHUALTLDEATLIXTAC).PDF)

^d <https://portal.ucol.mx/cueiv/mapapeligros.htm>

^e <https://www.uv.mx/osv/vulcanologia/mapas-de-susceptibilidad-y-peligro-volcanico/>

^f eruptive scenarios

^g <https://www.uv.mx/osv/vulcanologia/mapas-de-susceptibilidad-y-peligro-volcanico/>

^h ballistics

3.2 Sistemas de alerta pública

Para el Popocatepetl se utiliza un Sistema de Alerta de Semáforo Volcánico, con tres colores (verde, amarillo y rojo) para identificar el nivel de alerta para la población, y con diferentes fases en cada color para indicar las acciones que deben realizar las autoridades y el personal de Protección Civil [De la Cruz-Reyna y Tilling 2008]. Este sistema se puede consultar en línea*.

Recientemente, se implementó en el volcán de Colima, un Sistema de Alerta de Semáforo Volcánico de 4 colores (verde, amarillo, naranja y rojo). Este sistema puede cambiar en función de la actividad volcánica y se puede consultar en la web de Protección Civil del estado de Colima[†].

Existe un sistema electrónico de Semáforo de Alerta Volcánica (verde-amarillo-rojo, con creciente severidad de peligro) en la localidad de Chapultenango (6000 habitantes), ubicada a 10 km al este del volcán Chichón, que indica el estado del volcán en tiempo real. En la actualidad, se están haciendo arreglos para instalar más Semáforos Volcánicos electrónicos en otras localidades alrededor de los volcanes Chichón y Tacaná.

3.3 Otros sistemas

Los pronósticos de dispersión de cenizas volcánicas [basados en el código FALL3D, Folch et al. 2009] para los volcanes Popocatepetl y Colima son publicados diariamente por el Centro de Ciencias Atmosféricas y el Centro de Geociencias de la UNAM, respectivamente, y están disponibles a través de sus páginas web^{‡§}.

Una aplicación especialmente creada para facilitar la identificación de las rutas de evacuación y los refugios en el Popocatepetl, con la posibilidad de visualizarlos en el modo Street View de Google Earth, está disponible en línea[¶]. Actualmente, se está desarrollando una aplicación similar para el volcán Colima.

3.4 Comité Científico Asesor

Siempre que la actividad volcánica en el Popocatepetl parece estar cambiando o aumentando, el CENAPRED convoca el Comité Científico Asesor (CCA), un organismo colegiado que incluye a destacados vulcanólogos del Instituto de Geofísica de la UNAM y otras instituciones académicas, para analizar la información disponible y las evaluaciones de peligros provistas por el CE-

*<http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/194-CARTELSEMFORODEALERTAVOLCANICA.PDF>

†<http://www.proteccioncivil.col.gob.mx/>

‡<http://grupo-ioa.atmosfera.unam.mx/pronosticos/index.php/dispersion-de-cenizas>

§<http://terra.geociencias.unam.mx/ceniza>

¶<http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/rutasvolcan/>

NAPRED, con el fin de realizar un diagnóstico de los procesos y emitir recomendaciones sobre el nivel del Semáforo del Sistema de Alerta Volcánico. Las autoridades de Protección Civil tienen entonces la autoridad de actuar sobre esta información, para ordenar evacuaciones, cerrar o restringir el acceso a ciertas áreas o tomar otras medidas.

Un comité similar, integrado por destacados investigadores de la Universidad de Colima y partes interesadas de Protección Civil, se ha convocado durante las crisis del volcán Colima para discutir los datos adquiridos y, eventualmente, cambiar el nivel de alerta [Espinasa-Pereña et al. 2017]. El CMVS también cuenta con la colaboración de un Comité Científico Asesor, constituido por vulcanólogos reconocidos a nivel nacional e internacional.

4 DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN DE INFORMACIÓN

4.1 CENAPRED

El CENAPRED publica diariamente un informe sobre la actividad del volcán Popocatepetl*. Cada vez que se produce una emisión de cenizas, el CENAPRED informa al Centro Nacional de Comunicaciones (CENACOM).

Un gran número de publicaciones, tales como carteles infográficos, mapas de peligros, folletos e informes técnicos, pueden ser descargadas de la página web del CENAPRED†.

Como se dijo anteriormente, el CENAPRED interactúa con todos los demás observatorios volcánicos en México, y con el sistema de Protección Civil, a través de la Coordinación Nacional de Protección Civil, como ocurrió recientemente durante la crisis de Colima en 2015 [Espinasa-Pereña et al. 2017].

Además, se mantiene una fuerte colaboración con instituciones nacionales e internacionales, incluyendo los institutos de Geofísica, Geología y Geografía de la UNAM, el USGS a través del VDAF, el INSIVUMEH y CONRED de Guatemala, la Dirección General de Protección Civil, Prevención y Mitigación de Desastres de El Salvador (DGPCPMD), el Observatorio Volcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI), el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) de Perú y el Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER) de Nicaragua, mientras se mantiene un contacto permanente con representantes de la mayoría de los observatorios volcánicos en América del Sur.

4.2 CUEV, Universidad de Colima

La actividad volcánica actual del volcán de Colima, se describe en informes semanales publicados en el sitio

*<https://www.gob.mx/cenapred>

†<http://www.cenapred.gob.mx/PublicacionesWebGobMX/buscaindex>

web del CUEV‡. En caso de una actividad importante, se publican informes especiales a diario. Además, el sitio web incluye información sobre el volcán Colima y su sistema de monitoreo. Algunos datos, como sismogramas, acustigramas e imágenes de cámaras web, también están accesibles a través del mismo sitio web; las imágenes de las cámaras dedicadas al monitoreo de lahares están disponibles en línea§. El personal del CUEV visita con frecuencia las comunidades más cercanas al volcán para informar sobre la actividad en curso.

El CUEV interactúa con Protección Civil de los estados de Colima y Jalisco a través de un canal directo de comunicación entre los directores y el personal operativo. La mayor parte de la información generada por el CUEV se comparte con el CENAPRED. Además, se mantienen fuertes vínculos de colaboración con instituciones nacionales e internacionales, tales como el Centro de Geociencias y el Instituto de Geofísica de la UNAM, el GFZ-Postdam (en Alemania), el USGS (en Estados Unidos), la Universidad de Granada (en España), y la Université Savoie-Mont Blanc (en Francia).

4.3 OSV, Universidad Veracruzana

La información y productos derivados de los proyectos de investigación se publican en revistas, libros y otros medios impresos, algunos de los cuales se pueden encontrar en la página web¶. Los productos considerados importantes para la mitigación de riesgos se entregan a las oficinas de Protección Civil a nivel estatal y municipal, así como al CENAPRED.

4.4 CMVS, UNICACH

La UNICACH ofrece un programa de licenciatura en Ciencias de la Tierra, cuyos estudiantes participan en actividades de divulgación sobre peligros volcánicos en comunidades y escuelas alrededor de ambos volcanes. Además, el personal de la CMVS participa activa y continuamente en cursos, entrevistas de prensa (TV, radio y periódicos locales), conferencias y seminarios relacionados con peligros volcánicos, evaluación de riesgos y el estado de los volcanes El Chichón y Tacaná.

Se puede encontrar información en línea sobre los volcanes El Chichón y Tacaná, además de los peligros volcánicos y sísmicos, y otros temas relacionados con las Ciencias de la Tierra||**.

El CMVS colabora con la UNAM, el CENAPRED, el CUEV, el Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España, el USGS, el OVSICORI en Costa Rica e INGGEMMET en Perú.

‡<https://portal.ucol.mx/cueiv/>

§<http://terra.geociencias.unam.mx/vulcano>

¶<http://www.uv.mx/osv>

||<https://monitoreo.unicach.mx/>

**<https://es-la.facebook.com/IIGERCC/>

5 NECESIDADES, DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Desafortunadamente, la falta de recursos y personal, en conjunto con las deficiencias de cooperación y comunicación entre investigadores de diferentes instituciones (y a veces dentro de una institución) han obstaculizado severamente estos esfuerzos de monitoreo.

Las universidades públicas carecen de los recursos para mantener los equipos de monitoreo instalados en sus volcanes. Si bien los equipos se pueden comprar a través de las subvenciones y proyectos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por lo general existe escaso o nulo presupuesto para su mantenimiento, por lo que después de unos años el equipo se deteriora o funciona mal.

La creación de un Servicio Vulcanológico Nacional, que funcione de manera similar a los servicios meteorológicos y sismológicos existentes, posiblemente con sede en CENAPRED y en plena cooperación con los observatorios universitarios locales, ayudaría a concentrar todos los datos de monitoreo e información oficial sobre volcanes activos en una sola institución.

Espinasa-Pereña [2018] realizó un ranking preliminar de los 42 volcanes potencialmente activos en México, siguiendo la metodología de Ewert [2007]. Entre los seis volcanes más peligrosos (Popocatepetl, Colima, Ceboruco, Citlaltépetl, Tacaná, y El Chichón), solo cinco están siendo monitoreados permanentemente y solo el Ceboruco carece de sensores permanentes. Varios otros volcanes de alto riesgo carecen de sistemas de monitoreo, mientras que la mayoría de los restantes volcanes considerados posiblemente activos, no cuentan con ningún monitoreo. Una sola institución a cargo del monitoreo de volcanes ayudaría en la adquisición y distribución de recursos y también ayudaría a asignar esos recursos de acuerdo con un análisis de las necesidades de monitoreo y el riesgo relativo que plantean los diferentes volcanes. Debería garantizarse la disponibilidad de un estipendio anual para el mantenimiento de equipos y operaciones generales de los observatorios locales; y permitir la contratación de investigadores y personal técnico en aquellos observatorios cuyas universidades carecen de fondos suficientes.

Como demostró la crisis de 2015 en el volcán Colima [Espinasa-Pereña et al. 2017], las autoridades de Protección Civil a nivel federal recurren al CENAPRED –también una institución federal– para asesorarse, en lugar de acudir directamente a los investigadores individuales o el Comité Científico Local. Por lo tanto, un Servicio Vulcanológico Nacional serviría como una única fuente de información para los tomadores de decisiones, garantizando también que se utilice una sola voz para atender las inquietudes de todos los actores (autoridades federales y estatales, Protección Civil y medios de comunicación).

Una ventaja adicional de un Servicio Vulcanológico Nacional sería la homologación de las técnicas y me-

todologías utilizadas para el monitoreo de los volcanes de México, y la estandarización de los mapas de amenazas y sistemas de alerta (Sistema de Alerta Volcánica Semáforo), que actualmente es diferente en cada observatorio.

AGRADECIMIENTOS

Paulino Alonso del CENAPRED proporcionó algunos datos sobre la ubicación y la instrumentación presente en las estaciones de monitoreo del Popocatepetl. Los comentarios de Yémerith Alpizar, Lizeth Caballero García, Pablo Forte, Matt Patrick, y tres revisores anónimos fueron fundamentales para mejorar este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

R. Espinasa-Pereña proporcionó la mayor parte del texto sobre el CENAPRED, la actividad eruptiva y el monitoreo del Popocatepetl, y recopiló el resto de la información. R. Arámbula y L. Capra brindaron la información sobre el CUEV y la actividad eruptiva y el monitoreo del volcán de Colima. S. Ramos y M. Alatorre proporcionaron la información sobre el CMVS y la actividad eruptiva y el monitoreo de los volcanes El Chichón y Tacaná. K Sieron y F. Córdoba proporcionaron la información sobre el OVS y la actividad eruptiva y el monitoreo de los volcanes Citlaltépetl y San Martín Tuxtla. A Hernández-Oscoy proporcionó las figuras 1 a 3 y ayudó a recopilar información sobre el Popocatepetl y los otros volcanes.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados para este artículo y / o mayor información se pueden encontrar en la página web del CENAPRED (<https://www.gob.mx/cenapred>); información específica de los demás observatorios se puede encontrar en sus respectivas páginas web: CUEV (<https://portal.ucol.mx/cueiv/>), CMVS (<https://monitoreo.unicach.mx/>), OVS (<https://www.uv.mx/osv/>).

DERECHOS DE AUTOR

© 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., H. Morales-Iglesias, S. G. Ramos-Hernández, J. Jon-Selvas y J. M. Jiménez-

- Aguilar (2016). "Hazard zoning for volcanic ballistic impacts at El Chichón Volcano (Mexico)". *Natural Hazards* 81 (3), págs. 1733-1744. ISSN: 1573-0840. doi: 10.1007/s11069-016-2152-0.
- Arámbula-Mendoza, R., G. Reyes-Dávila, T. Domínguez-Reyes, D. Vargas-Bracamontes, M. González-Amezcuca, A. Martínez-Fierros y A. Ramírez-Vázquez (2019). "Seismic Activity Associated with Volcán de Colima". *Volcán de Colima*. Springer Berlin Heidelberg, págs. 195-218. doi: 10.1007/978-3-642-25911-1_1.
- Bretón-González, M., J. J. Ramírez y C. Navarro-Ochoa (2002). "Summary of the historical eruptive activity of Volcán De Colima, Mexico 1519–2000". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 117 (1-2), págs. 21-46. doi: 10.1016/s0377-0273(02)00233-0.
- Brown, S. K., M. Auker y R. Sparks (2015). "Populations around Holocene volcanoes and development of a Population Exposure Index". *Global Volcanic Hazards and Risk*. Ed. por S. C. Loughlin, S. Sparks, S. K. Brown, S. F. Jenkins y C. Vye-Brown, págs. 223-232. doi: 10.1017/cbo9781316276273.006.
- Capra, L., J. C. Gavilanes-Ruiz, R. Bonasia, R. Saucedo-Giron y R. Sulpizio (2015). "Re-assessing volcanic hazard zonation of Volcán de Colima, México". *Natural Hazards* 76 (1), págs. 41-61. doi: 10.1007/s11069-014-1480-1.
- Capra, L., G. Norini, G. GropPELLI, J. Macías y J. Arce (2008). "Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, México". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 176 (4), págs. 469-484. ISSN: 0377-0273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.04.016.
- Cortés, A., V. Garduño, J. Macías, C. Navarro-Ochoa, J. Komorowski, R. Saucedo y J. Gavilanes (2010). "Geologic mapping of the Colima volcanic complex (Mexico) and implications for hazard assessment". *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*. Geological Society of America. doi: 10.1130/2010.2464(12).
- De la Cruz-Reyna, S. y R. I. Tilling (2008). "Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 170 (1-2), págs. 121-134. ISSN: 0377-0273. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.09.002.
- Espinasa-Pereña, R. (2012). *Historia de la actividad del Volcán Popocatepetl 17 años de erupciones*. CENAPRED, Mexico.
- (2018). "Evaluación del riesgo relativo de los volcanes en México". *VIII Foro Internacional: Los volcanes y su impacto*, págs. 168-173.
- Espinasa-Pereña, R., A. Nieto-Torres y C. Gutiérrez (2017). "Manejo de las crisis volcánicas de 2012 y 2013 en el Popocatepetl y de 2015 en el volcán Fuego de Colima". *Revista de Administración Pública* 52 (2), págs. 171-188.
- 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).
- Folch, A., A. Costa y G. Macedonio (2009). "FALL3D: A computational model for transport and deposition of volcanic ash". *Computers & Geosciences* 35 (6), págs. 1334-1342. doi: 10.1016/j.cageo.2008.08.008.
- Luhr, J. F., T. Simkin y M. Cuasay (1993). *Parícutin: the volcano born in a Mexican cornfield*. US Geoscience Press.
- Macías, J. L., J. L. Arce, P. W. Layer, R. Saucedo y J. C. Mora (2015). "Eruptive History of the Tacaná Volcanic Complex". *Active Volcanoes of the World*. Springer Berlin Heidelberg, págs. 115-138. doi: 10.1007/978-3-642-25890-9_6.
- Macías, J. L., L. Capra, J. L. Arce, J. M. Espíndola, A. García-Palomo y M. F. Sheridan (2008). "Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175 (4), págs. 444-458. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.02.023.
- Macorps, E., S. J. Charbonnier, N. R. Varley, L. Capra, Z. Atlas y J. Cabré (2018). "Stratigraphy, sedimentology and inferred flow dynamics from the July 2015 block-and-ash flow deposits at Volcán de Colima, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 349, págs. 99-116. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2017.09.025.
- Martin-Del Pozzo, A., L. Arana, R. Bonasia, L. Capra, G. Córdoba, R. Cortés, H. Delgado, D. Ferrés, R. Fonseca, J. García, G. Gisbert, M. Jaimes, J. Macías, J. Portocarrero, S. Salinas, C. Siebe y E. Tellez (2016). *Mapas de peligros del volcán Popocatepetl*. [English language] [Nahuatl language]. Secretaría de Gobernación. [Map escala 1: 100,000].
- Medina-Martínez, F. (1983). "Analysis of the eruptive history of the Volcán Colima, Mexico, 1560–1980". *Geofísica Internacional* 22 (2), págs. 157-178.
- Morales Martínez, M. A., C. M. Welsh Rodríguez, L. C. Ruelas Monjardín, B. Weissling, K. Sieron y C. A. Ochoa Martínez (2016). "Afectaciones por posible asociación de eventos hidrometeorológicos y geológicos en los municipios de Calchahuaco y Coscomatepec, Veracruz". *Teoría y Praxis* 12 (Especial, Octubre 2016), págs. 31-49. ISSN: 1870-1582. doi: 10.22403/uqroomx/typne2016/02.
- Morán, D. J. (1985). *Geología de la República Mexicana: Instituto Nacional de Estadística*. Geografía e Informática, México DF, México. ISBN: 68-881-060-6.
- Navarro-Ochoa, C., A. Cortés y A. Tellez (2003). *Mapa de peligros del Volcán de Fuego de Colima*. <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/peligros-colima.html>. Universidad de Colima, México. [Map escala 1: 100,000].

- Reyes-Dávila, G. A., R. Arámbula-Mendoza, R. Espinasa-Pereña, M. J. Pankhurst, C. Navarro-Ochoa, I. Savov, D. M. Vargas-Bracamontes, A. Cortés-Cortés, C. Gutiérrez-Martínez, C. Valdés-González, T. Domínguez-Reyes, M. González-Amezcu, A. Martínez-Fierros, C. A. Ramírez-Vázquez, L. Cárdenas-González, E. Castañeda-Bastida, D. M. Vázquez Espinoza de los Monteros, A. Nieto-Torres, R. Campion, L. Courtois y P. D. Lee (2016). “Volcán de Colima dome collapse of July, 2015 and associated pyroclastic density currents”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 320, págs. 100-106. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2016.04.015](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.04.015).
- Rodríguez, S. R., I. Mora-González y J. L. Murrieta-Hernández (2006). “Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México”. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58 (2), págs. 223-236.
- Scolamacchia, T. y L. Capra (2015). “El Chichón Volcano: Eruptive History”. *Active Volcanoes of the World*. Springer Berlin Heidelberg, págs. 45-76. doi: [10.1007/978-3-642-25890-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-25890-9_3).
- Sheridan, M., G. Carrasco-Núñez, B. Hubbard, C. Siebe y S. Rodríguez (2002). *Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba)*. Institutes of Geology, Geophysics and Geography of UNAM, and Governments of Veracruz and Puebla States.
- Sieron, K., D. Ferrés, C. Siebe, R. Constantinescu, L. Capra, C. Connor, L. Connor, G. Groppelli y K. González Zuccolotto (2019). “Ceboruco hazard map: part II—modeling volcanic phenomena and construction of the general hazard map”. *Natural Hazards* 96 (2), págs. 893-933. ISSN: 1573-0840. doi: [10.1007/s11069-019-03577-5](https://doi.org/10.1007/s11069-019-03577-5).
- Sieron, K., L. Capra y S. Rodríguez-Elizarrarrás (2014). “Hazard assessment at San Martín volcano based on geological record, numerical modeling, and spatial analysis”. *Natural Hazards* 70 (1), págs. 275-297. doi: [10.1007/s11069-013-0807-7](https://doi.org/10.1007/s11069-013-0807-7).
- Vázquez, R., R. Bonasia, A. Folch, J. L. Arce y J. L. Macías (2019a). “Tephra fallout hazard assessment at Tacaná volcano (Mexico)”. *Journal of South American Earth Sciences* 91, págs. 253-259. doi: [10.1016/j.jsames.2019.02.013](https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.02.013).
- Vázquez, R., J. L. Macías, J. L. Arce, G. Cisneros y R. Saucedo (2019b). “Numerical simulation of block-and-ash flows for different eruptive scenarios of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 373, págs. 36-50. doi: [10.1016/j.jvolgeores.2019.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.026).