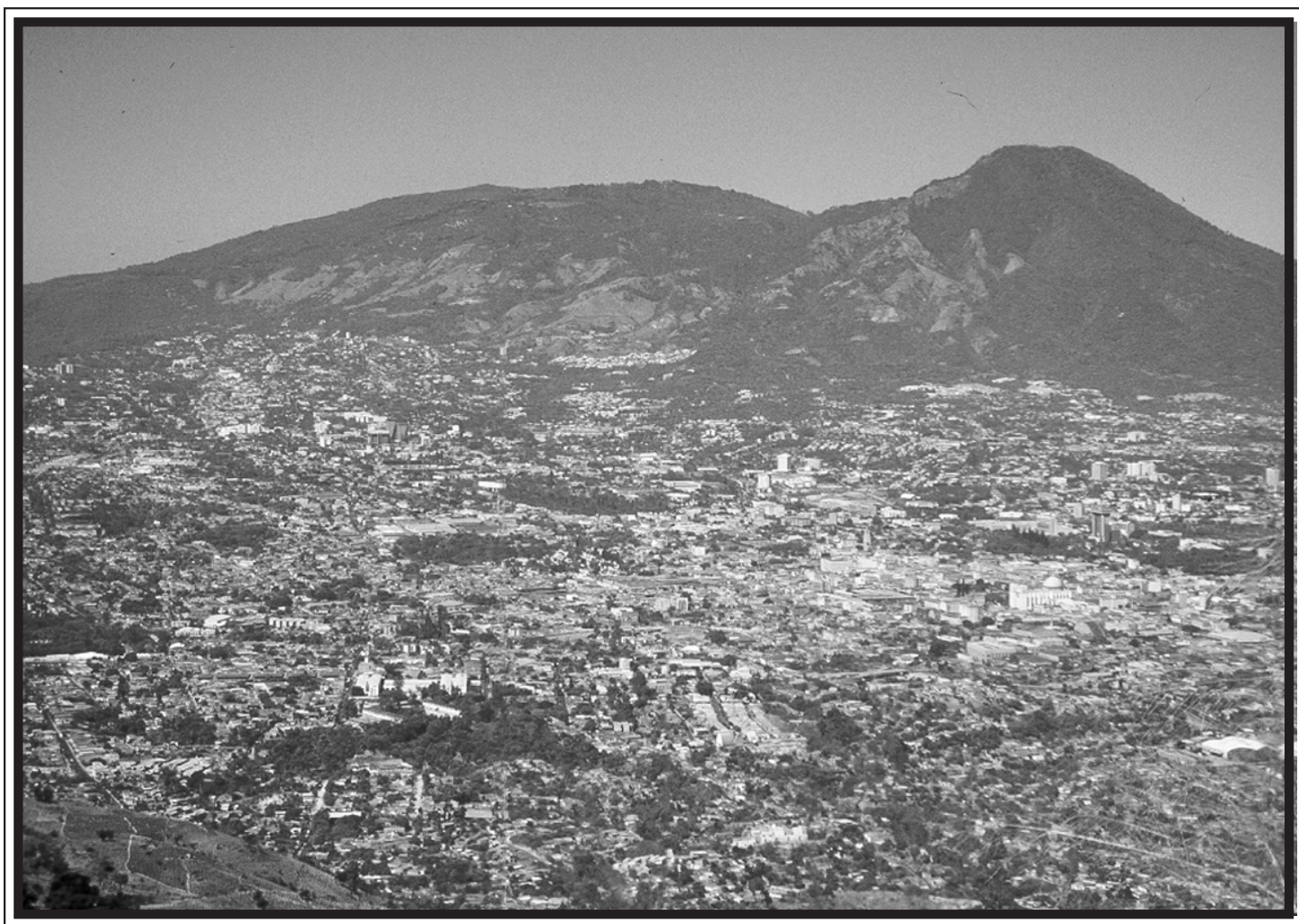


Departamento del Interior de los Estados Unidos
Investigación geológica de los Estados Unidos

Riesgos Volcánicos en la Región de San Salvador, El Salvador



Reporte de archivo abierto 01–366

Fotografía de la portada

Vista del volcán San Salvador desde el sureste. El edificio completo de El Boquerón se encuentra a la izquierda, y la ladera de El Picacho se muestra a la derecha. La ciudad de San Salvador se muestra en primer plano *(Fotografía de J.J. Major)*

Riesgos Volcánicos en la Región de San Salvador, El Salvador

Por J.J. Major, S.P. Schilling, D.J. Sofield, C.D. Escobar y C.R. Pullinger

**Investigación geológica de los Estados Unidos
Reporte de archive abierto 01-366**

Departamento del Interior de los Estados Unidos
Gale Norton, *Secretario*

Investigación geológica de los Estados Unidos
Charles G. Groat, *Director*

Este es un reporte preliminar y no se ha revisado su cumplimiento con los estándares editoriales de la U.S. Geological Survey. Cualquier uso de los nombres comerciales, de productos o de empresas sólo tiene finalidades de descripción y no implica patrocinio por parte del gobierno de los Estados Unidos.

Para comprar las publicaciones de la USGS póngase en contacto con:

U.S. Geological Survey
Information Services
P.O. Box 25286
Denver, CO 80225
(303) 202-4210

Este reporte también se encuentra disponible de manera digital en la Internet.
URL: <http://vulcan.wr.usgs.gov/Volcanoes/ElSalvador>

CONTENIDO

Introducción	1
El fenómeno volcánico	2
Fenómenos de riesgo en los volcanes compuestos	4
Tefra	4
Flujo piroclástico y oleada piroclástica	5
Flujos de lava y domos de lava	6
Gases volcánicos	6
Avalancha de escombros, desprendimientos de tierra y lahar	7
Fenómenos de riesgo en los volcanes monogenéticos	8
Eventos anteriores en el volcán San Salvador	9
Actividad futura en el volcán San Salvador	12
Eventos en otros volcanes que pueden afectar la región de San Salvador	13
Mapas de zonas de riesgo volcánico	13
Zona de riesgo volcánico proximal	14
Zonas de riesgo por lahar	15
Zona de riesgo volcánico regional	16
Advertencias y pronósticos de riesgo	16
Protección a las comunidades y ciudadanos en contra de los riesgos relacionados al volcán	17
Referencias	18
Lecturas adicionales sugeridas	18
Notas finales	18

ILUSTRACIONES [en el bolsillo]

- I. Riesgos volcánicos en la región de San Salvador, El Salvador. Zonas de riesgo volcánico proximal y lahar debido a un evento en el volcán San Salvador.
- II. Riesgos volcánicos en la región de San Salvador, El Salvador. Zona de riesgo volcánico regional que podría verse afectada por erupciones de volcanes monogenéticos.

FIGURAS

1. Ubicación de las principales ciudades y volcanes cuaternarios significativos en El Salvador.	2
2. Esquema simplificado que muestra los eventos de riesgo asociados con volcanes semejantes al volcán San Salvador.	3
3. Resumen de la historia de erupciones del volcán San Salvador, basado ampliamente en Sofield (1998)	10

Riesgos volcánicos en la región de San Salvador, El Salvador

Por J.J. Major, S.P. Schilling, D.J. Sofield¹, C.D. Escobar² y C.R. Pullinger²

INTRODUCCIÓN

El volcán San Salvador es uno de los muchos volcanes a lo largo del arco volcánico en El Salvador (figura1). Este volcán, con un volumen de aproximadamente 110 kilómetros cúbicos, corona a San Salvador, la ciudad más grande y capital de país. La ciudad tiene una población de aproximadamente 2 millones y una densidad poblacional de aproximadamente 2100 habitantes por kilómetro cuadrado. La ciudad de San Salvador y otras comunidades han invadido gradualmente las faldas del volcán, aumentando el riesgo de que incluso los eventos pequeños puedan tener consecuencias sociales serias. El volcán San Salvador no ha tenido una erupción en más de 80 años, sin embargo tiene una larga historia de erupciones repetidas y en muchas ocasiones violentas. El volcán está compuesto de restos de centros de erupciones múltiples y comúnmente se hace referencia a estos restos por medio de varios nombres. La parte central del volcán, que contiene un gran cráter circular, se conoce como El Boquerón, el cual se eleva a una altitud de aproximadamente 1890 metros. El Picacho, el prominente pico con la mayor elevación (altitud de 1960 metros) al noreste del cráter y El Jabalí, el pico al noroeste del cráter, representan los restos

de un edificio más antiguo y de mayores dimensiones. El volcán ha hecho erupción en varias ocasiones en los últimos 70,000 años desde escapes por la parte central del volcán como también desde escapes más pequeños y fisuras en sus flancos [1] (los números entre paréntesis cuadrados se refieren a las notas finales del reporte). Además, se localizan varios conos pequeños de ceniza volcánica y cráteres de explosiones en un radio de 10 kilómetros alrededor del volcán. Desde aproximadamente el año 1200 D.C. han ocurrido erupciones casi exclusivamente a lo largo, o a unos cuantos kilómetros más allá, del flanco noroeste del volcán, las cuales han consistido principalmente en explosiones pequeñas y del emplazamiento de flujos de lava. Sin embargo, el volcán San Salvador ha tenido erupciones violentas y explosivas en el pasado, incluso en fechas tan recientes como hace 800 años. Cuando estas erupciones ocurran de nuevo estarán en riesgo una parte importante de la infraestructura y de la población.

Las erupciones volcánicas no son los únicos eventos que ponen en riesgo a las comunidades locales. Otra preocupación se refiere a los desprendimientos de tierra y a los flujos de escombros asociados (un flujo acuoso de lodo,

¹ GeoEngineers, Inc., Tacoma, WA, 98402, U.S.A.

² Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Ave. Roosevelt y 55 Ave. Norte, Torre El Salvador (IPSFA)

rocas y escombros también conocido como lahar) el cual es un fenómeno que podría presentarse durante los periodos sin actividad volcánica. Un evento de este tipo ocurrió en 1998 en el volcán Casita en Nicaragua cuando una lluvia extremadamente torrencial proveniente del huracán Mitch ocasionó un desprendimiento de tierra que se movió pendiente abajo y se transformó en un flujo de escombros en rápido movimiento que destruyó dos poblaciones además de ocasionar la muerte de más de 2000 personas. En el volcán de San Salvador existen desprendimientos de tierra históricos, de volúmenes de hasta unos cientos de miles de metros cúbicos, debido a lluvias torrenciales y temblores, algunos de los cuales se han transformado en flujos de escombros que han inundado áreas pobladas aguas abajo. Los desprendimientos de tierra destructivos debidos a lluvias o temblores así como los flujos de escombros en o en las cercanías del volcán San

Salvador en septiembre de 1982 y enero de 2001 demuestran que dichos movimientos masivos en El Salvador también han sido letales.

Este reporte describe los tipos de eventos de riesgo que ocurren en los volcanes en general y los tipos de eventos geológicos de riesgo que han ocurrido en el volcán San Salvador en el pasado. Los mapas incluidos de las distintas zonas de riesgo volcánico muestran las áreas en que el riesgo es más probable si dichos eventos peligrosos ocurriesen de nuevo.

EL FENÓMENO VOLCÁNICO

Los volcanes poseen una variedad de riesgos geológicos tanto durante las erupciones como en ausencia de la actividad eruptiva (figura 2). Muchos de los eventos de riesgo descritos en la figura 2 han ocurrido en el volcán San Salvador en el pasado y es muy probable que se repitan en el

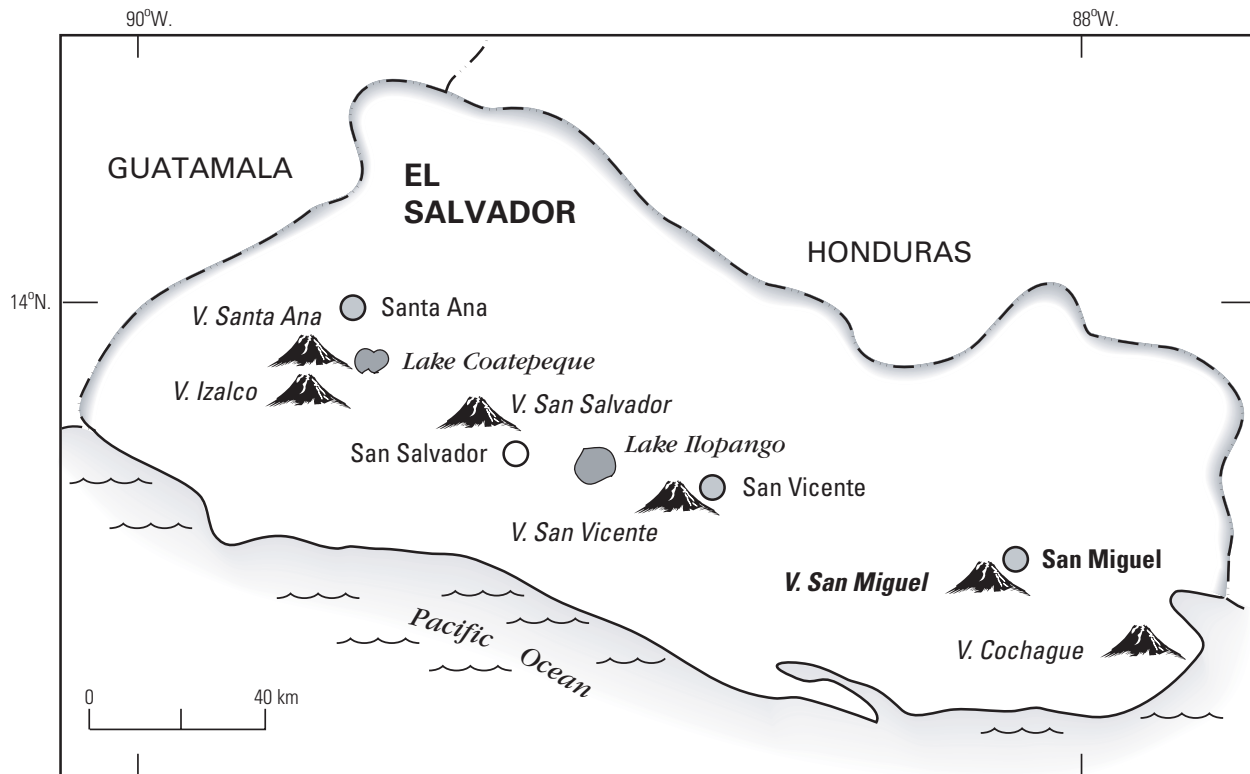


Figura 1. Ubicación de las principales ciudades y volcanes cuaternarios significativos en El Salvador. Los círculos indican las ciudades principales, los triángulos indican a los volcanes más importantes. El lago Coatepeque y el lago Ilopango son calderas de sílice de grandes dimensiones.

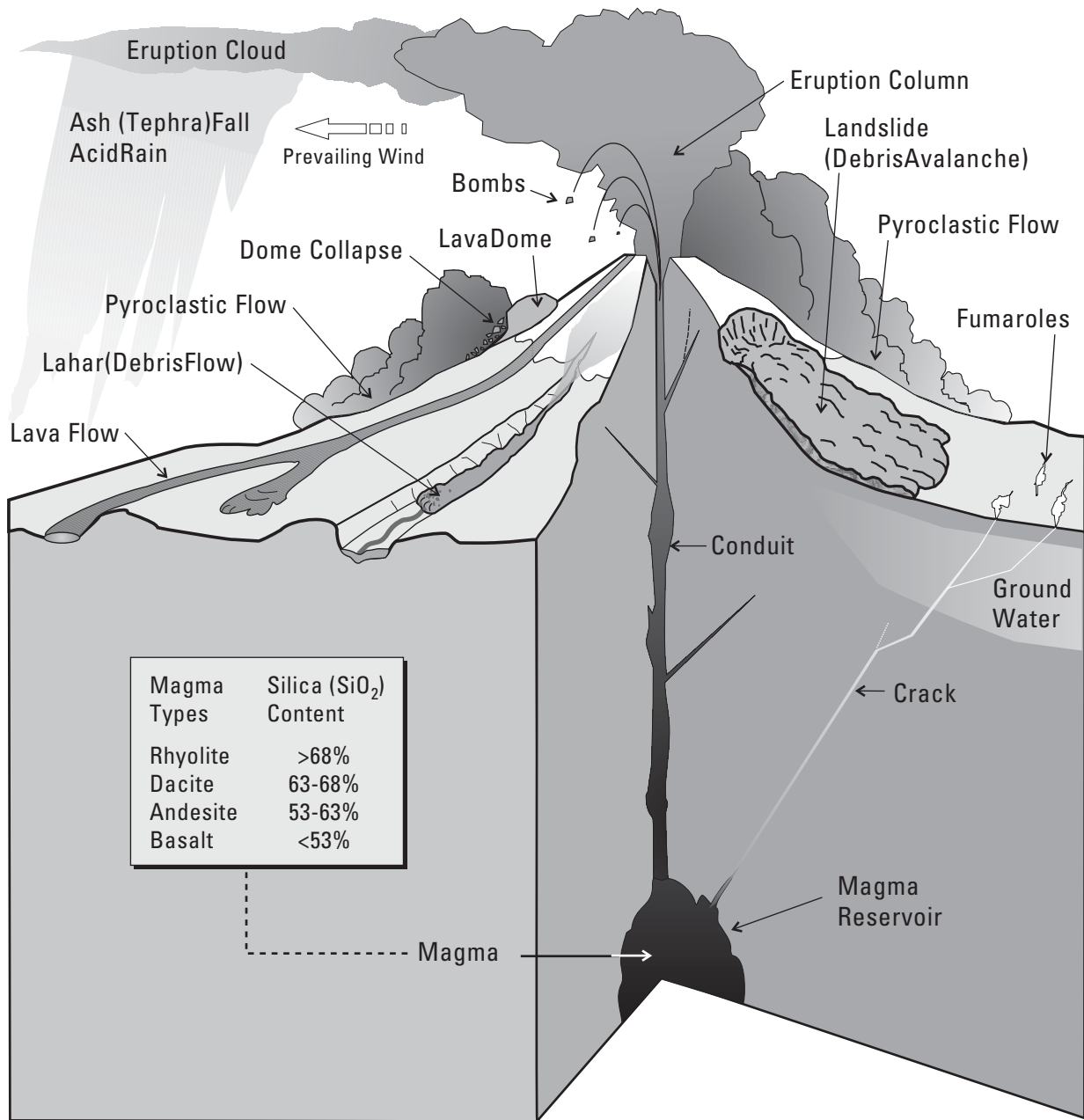


Figura 2. Esquema simplificado que muestra los eventos de riesgo asociados con volcanes semejantes al volcán San Salvador. Los eventos de lahares y desprendimientos de tierra (avalanchas de escombros) pueden ocurrir aún cuando el volcán no presenta actividad eruptiva. Los recuadros muestran la clasificación de los tipos de magma con base en el contenido de sílice Ilustración de Bobby Meyers, modificado de la hoja de hechos USGS 002-97.

futuro. La mayoría de estos eventos son causados por la erupción de roca fundida, o **magma**, pero algunos otros, como las avalanchas de escombros (desprendimientos de tierra) y lahares, pueden ocurrir sin actividad eruptiva. La naturaleza y escala de la actividad eruptiva depende en parte del tamaño y el tipo de volcán, la composición del magma y de las interacciones entre el magma y el agua.

En la región de San Salvador se encuentran dos tipos de volcanes: Volcanes compuestos y conos monogenéticos. Los **volcanes compuestos** tienen erupciones periódicas a lo largo de intervalos de tiempo de cientos de miles de años y pueden tener un amplio rango de estilos de erupción. El volcán San Salvador es un volcán compuesto que ha presentado periodos de actividad por más de 70,000 años.

Los **volcanes monogenéticos** presentan erupciones de manera típica únicamente durante intervalos de tiempo breves – desde semanas a algunos cientos de años – y en general tienen un rango más estrecho en su comportamiento eruptivo. El magma de muchos volcanes monogenéticos es basáltico en su composición, pero algunos magmas pueden tener contenidos elevados de silicio que van de la andesita a la dacita (véase el recuadro de la figura 2). Entre mayor sea la cantidad de silicio en el magma, más explosiva será la erupción. En la región de San Salvador, las erupciones de volcanes monogenéticos han producido cráteres de explosión, conos de ceniza volcánica y flujos de lava. Las rocas provenientes de la mayoría de estos centros monogenéticos tienen composiciones andesíticas (los contenidos de silicio van de aproximadamente el 54% hasta el 61%), pero en unos cuantos tienen composiciones basálticas (menos del 53% de contenido de silicio). Se encuentran conos de ceniza volcánica prominentes en el área que incluye al Cerro El Playón, Montaña Quezaltepeque, Plan del Hoyo, Cerro las Víboras y Laguna Caldera (ilustraciones 1 y 2). Los cráteres de explosión más importantes incluyen Laguna de Chanmico, el cráter del Resumidero, el cráter Las Granadillas y otros cráteres sin nombre principalmente en el flanco noroeste del volcán (ilustraciones 1 y 2). Los flujos de lava de las erupciones provenientes de

los centros monogenéticos o de las fisuras sobre los flancos del volcán se encuentran principalmente al norte y se extienden a unos pocos kilómetros al noroeste de Quezaltepeque.

Fenómenos de riesgo en los volcanes compuestos

Tefra

A medida que el magma emerge de la superficie del volcán, se liberan los gases disueltos en el magma. Si el gas se libera rápidamente entonces el magma puede romperse explosivamente en fragmentos más pequeños y dispersarse en la atmósfera. Los fragmentos provenientes de dichas erupciones, con un intervalo que va desde ceniza microscópica hasta bloques de varios metros, se denominan en conjunto como **tefra**. Las tefras forman depósitos que cubren áreas extensas, a favor del viento, desde un volcán. El grosor y tamaño de partículas de un depósito generalmente disminuye entre mayor sea la distancia desde la zona de escape, sin embargo un depósito puede cubrir áreas extensas de decenas a cientos de kilómetros desde su fuente. Los fragmentos más grandes, denominados **proyectiles balísticos**, caen a tierra a distancias de unos cuantos kilómetros de la zona de escape.

Las caídas de tefra raras veces amenazan directamente a la vida, excepto dentro de unos cuantos kilómetros desde un escape. Los fragmentos balísticos más grandes son capaces de causar la muerte o daños por impacto. Los proyectiles más grandes también pueden permanecer calientes cuando aterrizan e iniciar incendios si caen sobre materiales combustibles. La mayoría de los daños y fatalidades provenientes de las caídas de tefra ocurren cuando las acumulaciones de tefra son considerables o están saturadas por la lluvia, y por ello tienen el peso suficiente como para colapsar los techos de las construcciones. La tefra fina suspendida en el aire puede causar irritación en los ojos y en el sistema respiratorio además de exacerbar los problemas pulmonares, especialmente en los ancianos y los niños.

Los efectos indirectos de las caídas de tefra pueden quizás ser más dañinos que los efectos directos ocasionados por las mismas. Incluso las acumulaciones más delgadas de las caídas de tefra pueden afectar de manera significativa las actividades sociales y económicas en regiones extensas. Los penachos de tefra pueden crear oscuridad durante varias decenas de minutos o incluso más tiempo, aún en días soleados, además las caídas de tefra pueden reducir la visibilidad y la maniobrabilidad en las carreteras. La tefra que ingresa a los motores de los vehículos puede bloquear los filtros y aumentar el desgaste. Los depósitos de tefra pueden ocasionar cortos circuitos o cortes eléctricos en los transformadores y líneas de potencia, especialmente si la tefra se encuentra húmeda, pegajosa y pesada. La tefra puede contaminar los suministros de agua potable superficial, puede bloquear los sistemas de drenaje sanitarios y para aguas de lluvia, además de obstruir los canales de irrigación. Incluso las acumulaciones de tefra delgadas pueden arruinar los cultivos sensibles. Un peligro serio potencial de la tefra proviene de la amenaza de que incluso las nubes de tefra más diluidas y con las partículas más pequeñas pueden obstruir el sistema propulsor de las naves aéreas cuando éstas vuelan dentro de dichas nubes. El ingreso de incluso pequeñas cantidades de tefra de pequeñas dimensiones dentro de los motores de propulsión puede causar en ellos un mal funcionamiento y la pérdida de potencia.

Las lecciones aprendidas de la erupción, en 1980, del Monte Santa Helena en los Estados Unidos pueden ayudar a los gobiernos, empresas y ciudadanos a prepararse para futuras caídas de tefra. Las comunidades a favor del viento del Monte Santa Helena experimentaron daños significativos en el transporte, la actividad comercial y en los servicios con caídas de tefra de únicamente 5 milímetros. Entre mayor sea la cantidad de la caída de tefra, más tiempo le tomará a las comunidades recuperarse. Tal como lo percibieron los residentes, las caídas de tefra de menos de 5 milímetros fueron las que presentaron inconvenientes importantes, mientras que las de más de 150 mm constituyeron un desastre. No obstante, todas las comunidades a favor del viento afectadas por el Monte Santa Elena recuperaron

sus actividades normales dos semanas después del evento.

Las erupciones del volcán San Salvador y los conos de ceniza volcánica asociados han depositado varias capas de tefra en los últimos 70,000 años [1]. Aunque muchas de las capas son relativamente delgadas (con un grosor de menos de varios centímetros) más allá del volcán, una erupción que ocurrió hace alrededor de 30,000 a 40,000 años depositó una capa de tefra con un grosor de hasta un metro en un radio de 10 kilómetros alrededor del volcán. Esta capa de tefra está compuesta principalmente de **pómez**, un fragmento esponjoso y ligero de la explosión de magma, el cual indica que el magma rico en gases del interior del volcán hizo erupción de manera violenta. Las composiciones, texturas y distribuciones de las otras capas de tefra, especialmente las de erupciones de los conos sobre los flancos del volcán, indican que algunas de las erupciones explosivas fueron **freatomagmáticas** e involucraron las interacciones entre el magma y el agua.

Flujo piroclástico y oleada piroclástica

En ocasiones la mezcla de gases calientes y las partículas de roca volcánica producidas por una erupción explosiva es más densa que el aire, por lo cual en vez de elevarse por encima de la zona de escape para producir la tefra dicha mezcla densa se comporta como un fluido, permaneciendo cerca de la tierra y fluyendo pendiente abajo. Si la mezcla se compone principalmente de partículas de roca, entonces ésta tiene una densidad elevada y su trayectoria se confinará a las áreas topográficamente bajas, en la medida en que la topografía controle el flujo de agua. Este tipo de flujo denso se denomina **flujo piroclástico**. Sin embargo, si la mezcla se compone principalmente de gas con una pequeña proporción de fragmentos de roca, entonces tendrá una menor densidad y su trayectoria estará menos controlada por la topografía. Este tipo de mezcla rica en gas se denomina **oleada piroclástica**. Los flujos y las oleadas piroclásticas también producen nubes de ceniza que pueden elevarse a cientos de metros en el aire, arrastrarse a favor del viento y transportar

la tefra a decenas de kilómetros o a una distancia mayor lejos del volcán.

Los flujos y las oleadas piroclásticas con frecuencia se producen al mismo tiempo, siendo ambos fenómenos altamente riesgosos. Se mueven a velocidades tan rápidas como los 50 a 150 kilómetros por hora, por lo que el tratar de escapar de su trayectoria es muy difícil o imposible. Las temperaturas en los flujos y oleadas piroclásticas comúnmente son de varios cientos de grados centígrados o incluso más. Debido a su elevada densidad, su enorme velocidad y alta temperatura, los flujos piroclásticos pueden destruir todas las estructuras y matar a todos los seres vivos en su trayectoria debido a los impactos, por incineración o sepultados. Aunque las oleadas piroclásticas son más diluidas y menos densas que los flujos piroclásticos, las oleadas pueden afectar áreas extensas y aún ser muy destructivas y letales. Las personas y los animales atrapados por las oleadas piroclásticas pueden morir directamente por traumas, quemaduras severas o sofocación.

Han existido al menos dos episodios eruptivos en el volcán San Salvador que han producido flujos y oleadas piroclásticas. Un episodio se relaciona con una erupción que produjo el grueso depósito de pómez debido a una caída de tefra hace unos 30,000 a 40,000 años. Un episodio eruptivo más reciente en 1200 D.C. también produjo flujos y oleadas piroclásticas.

Flujos de lava y domos de lava

La **lava** es el magma líquido que emana a la superficie de la tierra sin explosiones. Dependiendo de la viscosidad y de la velocidad de la descarga, la lava formará un **domo de lava** en forma de bulbo sobre un escape o un **flujo de lava** que puede viajar varios kilómetros o más pendiente abajo desde la zona de escape. Los flujos de lava comúnmente se mueven pendiente abajo como corrientes de roca fundida con un grosor que va de unos cuantos a decenas de metros. La velocidad a la cual fluye la lava depende principalmente de su composición química. Las lavas basálticas del tipo observado en Hawai pueden moverse rápidamente, unas decenas de metros por minuto, mientras que las lavas andesíticas del tipo comúnmente encontrado

en las erupciones de los volcanes en San Salvador son más lentas y se mueven unas cuantas decenas de metros por hora. Aunque los flujos de lava pueden ser extremadamente destructivos, típicamente no representan ninguna amenaza para la vida. Las personas y los animales pueden caminar normalmente fuera de la trayectoria del avance del flujo. Sin embargo, los frentes de los flujos de lava lentos que se mueven a través de pendientes empinadas pueden colapsarse en ocasiones y generar bloques de escombros calientes que caen entonces en cascada pendiente abajo, rompiéndose en partes y formando flujos u oleadas piroclásticas peligrosas y con movimiento rápido.

Los domos de lava pueden representar un riesgo mayor que los flujos de lava. Los domos de lava se forman a partir de lava que es más viscosa que la de los flujos de lava, como resultado de esto pueden aumentar sus dimensiones sobre las pendientes empinadas o hacer formaciones de tierra con flancos empinados. A medida que un domo de lava crece en dimensiones, se vuelve inestable y se colapsa en numerosas ocasiones, además también genera bloques de escombros calientes que caen en cascada pendiente abajo, rompiéndose en partes y formando flujos u oleadas piroclásticas peligrosas y con movimiento rápido.

Los flujos de lava se extienden hacia abajo en todos los flancos del volcán San Salvador, pero muchos de estos flujos se concentran sobre los flancos norte y noroeste del volcán. Aunque algunos flujos individuales de lava son difíciles de seguir completamente, los campos de los flujos de lava se forman a distancias de aproximadamente 5 hasta 10 kilómetros lejos del cráter de la cumbre. No se han podido reconocer domos de lava en el volcán.

Gases volcánicos

Todos los magmas contienen gases que se liberan durante y entre erupciones. Los gases volcánicos constan principalmente de vapor pero también contienen dióxido de carbono y compuestos de azufre y cloro, así como también cantidades menores de otros gases diversos.

Generalmente, los gases volcánicos se diluyen rápidamente a favor del viento desde el escape, pero dentro de unos cuantos kilómetros de un escape pueden poner en peligro la vida y la salud si las concentraciones son elevadas y la exposición es prolongada. Los ojos y los pulmones de las personas y los animales pueden verse dañados por los ácidos, amoníaco y otros compuestos. Las personas y los animales pueden sofocarse en los gases más densos que el aire como los de dióxido de carbono, que quedan atrapados y se acumulan en las depresiones cerradas.

Los mayores riesgos provienen directamente de los gases emitidos por el volcán San Salvador, los cuales probablemente queden confinados al cráter de la cumbre y así ser motivo de preocupación para aquellos que trabajan o se recrean dentro del cráter. Fuera del cráter de la cumbre, los riesgos directos provenientes de los gases volcánicos probablemente sean menores.

Un riesgo más amplio, pero indirecto, proveniente de los gases volcánicos emitidos por el volcán San Salvador involucra la formación de lluvia ácida. Los compuestos de azufre son uno de los principales gases emitidos por los volcanes, por lo que una acidificación excesiva de la lluvia puede ocurrir cuando los compuestos de azufre se combinan con las gotas y el vapor de agua para formar ácido sulfúrico el cual se deposita durante las tormentas. Si dicho ácido se encuentra lo suficientemente concentrado puede dañar los cultivos, reducir la productividad de la tierra y contaminar el agua superficial. En El Salvador, la lluvia ácida resultante de la emisión de los gases volcánicos ha dañado localmente los cultivos de café, particularmente alrededor del volcán Santa Ana [2].

Avalancha de escombros, desprendimientos de tierra y lahar

Las pendientes de un volcán pueden volverse inestables y caer catastróficamente, generando un movimiento rápido **pendiente abajo** denominado **avalancha de escombros**. La inestabilidad de la pendiente en los volcanes puede ser provocada por numerosos factores. El magma que se eleva hacia arriba a través de un volcán puede empujar a la roca volcánica anterior y deformar y estratificar

los flancos de un volcán, o el agua caliente y ácida del interior puede circular a través de las grietas y zonas porosas dentro de un volcán, alterar la roca más fuerte para aflojar la arcilla resbaladiza y debilitar gradualmente el volcán de modo que sea susceptible a las avalanchas de escombros. Las pendientes de un volcán también pueden caer sin una acción directa del magma. Los temblores inesperados, las lluvias torrenciales o las explosiones de vapor pueden provocar fallas en la pendiente, sin embargo estas fallas comúnmente son de menor volumen que las de la intrusión magmática. Las avalanchas de escombros pueden alcanzar velocidades que superan los 150 kilómetros por hora; generalmente entre mayor sea la avalancha el viaje de la misma es más rápido y alcanza distancias más lejanas. Las avalanchas de escombros de volúmenes pequeños viajan típicamente solo unos cuantos kilómetros desde su fuente, sin embargo las avalanchas de escombros de gran volumen pueden viajar decenas de kilómetros desde el volcán. Las avalanchas de escombros destruyen todo lo que encuentran en su trayectoria y dejan depósitos con grosores que van de los 10 metros y hasta más de 100 metros en la superficie de los valles.

En numerosos volcanes alrededor del mundo se han podido reconocer los depósitos de las avalanchas de escombros, incluyendo los volcanes en El Salvador. Sin embargo, todavía no se han podido reconocer depósitos de avalanchas de escombros de grandes dimensiones en el volcán de San Salvador, lo cual sugiere que gran parte del volcán no se ha colapsado catastróficamente. Sin embargo, el volcán de San Salvador es un volcán grande, por lo que la posibilidad de un futuro colapso en uno de sus flancos no debe desestimarse.

Los **lahares**, también denominados flujos de lodo y flujos de escombros, son masas fluidas de lodo, roca y agua con una apariencia semejante a la del concreto. Éstos se producen cuando el agua mueve grandes volúmenes de lodo, roca y escombros volcánicos flojos. Comúnmente los desprendimientos de tierra y las avalanchas de escombros se convierten en lahares a medida que se mueven hacia abajo del valle. Los lahares, como las inundaciones, cubren las planicies de inundación y sumergen las estructuras en las áreas

más bajas. Estos pueden viajar varias decenas de kilómetros a velocidades de decenas de kilómetros por hora. Los lahares pueden destruir o dañar todo lo que encuentran en su trayectoria, enterrándolo o impactándolo. Los lahares siguen los valles de los ríos y dejan un depósito de arena lodosa y cascajo que pueden alcanzar grosores que van de unos cuantos metros a decenas de metros. Los lahares son particularmente riesgosos debido a que viajan mucho más lejos de un volcán que cualquier otro fenómeno de riesgo con excepción de la tefra, además de que afectan los valles principales en donde los asentamientos humanos son más grandes. En algunos casos los desprendimientos de tierra y los lahares pueden obstruir un canal o bloquear un canal tributario y embalsar un lago detrás del bloqueo. Comúnmente, el agua embalsada puede derramarse sobre el bloqueo, cortando rápidamente un canal, drenando de manera catastrófica el lago y generando una inundación que se mueve valle abajo poniendo en peligro a las personas y sus propiedades. El rompimiento del bloqueo puede ocurrir en unas horas o meses después del embalsado.

Como las inundaciones, la amplitud de los lahares varía enormemente en sus dimensiones. La recurrencia de los lahares más pequeños es más frecuente (quizás cada pocos años), mientras que la recurrencia de los de mayores dimensiones suceden en periodos de tiempo de centurias o milenios. La dimensión de los lahares está controlada tanto por la cantidad de agua como del sedimento flojo o escombros volcánicos disponibles. Las avalanchas de escombros o erupciones mayores pueden verter de decenas a miles de millones de metros cúbicos de sedimento dentro de los canales y producir lahares de grandes dimensiones. Las avalanchas de escombros o erupciones de pequeñas dimensiones producen lahares también pequeños. Los lahares han ocurrido en el volcán San Salvador: lahares y desprendimientos de tierra históricos, con volúmenes de más de 100,000 metros cúbicos, han caído desde las pendientes superiores más empinadas del volcán viajando más de 4 kilómetros desde sus fuentes [1].

Los lahares y desprendimientos de tierra pueden causar problemas prolongados después de que ha concluido el evento que les ha formado.

Una vez que los lahares y desprendimientos de tierra llenan los canales de la corriente con sedimentos, las corrientes comienzan a erosionar nuevas trayectorias, además los nuevos canales de la corriente pueden ser altamente inestables y se bifurcan rápidamente a medida que el sedimento se erosiona y se mueve más adelante valle abajo. La bifurcación rápida de la corriente puede provocar una erosión rápida y dramática de la ribera. Además, debido a que los canales de la corriente se encuentran obstruidos con sedimentos, tienen menos capacidad de transportar agua. Como resultado, inundaciones relativamente pequeñas, las cuales podrían haber pasado desapercibidas previamente, pueden representar amenazas potencialmente significativas para la gente que habita en las áreas bajas. En general, la gente que vive en las áreas bajas a lo largo de los valles del río es más susceptible para estas afectaciones secundarias provenientes de los desprendimientos de tierra y lahares, sin embargo en las tierras más elevadas adyacentes a los canales del río, aparentemente a salvo de inundaciones, pueden encontrarse amenazados por la erosión de la ribera. Los ejemplos obtenidos de muchos volcanes alrededor de todo el mundo muestran que los efectos del depósito de sedimentos debido a los desprendimientos de tierra y lahares en canales de corriente pueden persistir por varios años e incluso décadas [3].

Fenómenos de riesgo en los volcanes monogenéticos

Los volcanes monogenéticos en el área de San Salvador tienen una composición predominantemente andesítica. Aunque sus composiciones son similares a los de muchos productos eruptivos provenientes del volcán San Salvador, los efectos de sus erupciones generalmente no se extienden más allá de su fuente. Las erupciones futuras de los cráteres monogenéticos y conos de ceniza volcánica pueden presentar explosiones pequeñas y el emplazamiento de flujos de lava. Quizás los eventos más peligrosos asociados con los volcanes monogenéticos ocurren cuando la lava ascendente interactúa con el agua superficial o el agua que la tierra ha absorbido y produce explosiones de

vapor, además de flujos y oleadas piroclásticas, que pueden viajar rápidamente hacia fuera a distancias de varios kilómetros desde la zona de escape. Los depósitos y los cráteres de explosión producidos por las interacciones del magma y el agua se ubican al lado noroeste del volcán San Salvador.

EVENTOS ANTERIORES EN EL VOLCÁN SAN SALVADOR

El volcán San Salvador ha presentado erupciones intermitentes por más de 70,000 años, las observaciones históricas de las erupciones provienen de hace aproximadamente unos 500 años [1]. Sin embargo, solo han ocurrido tres erupciones desde el año 1500, las cuales consistieron en una serie de explosiones pequeñas de magma basáltico de baja viscosidad y el emplazamiento de flujos de lava basáltica sobre los flancos del volcán. La mayor parte de la información acerca del comportamiento pasado de San Salvador proviene de los estudios de los depósitos producidos por los eventos prehistóricos. Se desconocen muchos de los detalles de las erupciones del pasado así como la edad precisa del volcán, sin embargo es claro que el volcán ha mostrado un amplio espectro de comportamientos eruptivos – desde eventos altamente explosivos hasta flujos de lava relativamente tranquilos (figura 3).

El cuerpo del volcán se formó hace más de 70,000 años. Las rocas más antiguas de los depósitos subterráneos expuestos en San Salvador provienen de una erupción de más de 72,000 años de antigüedad de Coatepeque, una caldera que se ubica a unos 50 kilómetros al oeste de San Salvador [4]. Estas rocas antiguas del volcán San Salvador constan de lavas y tefras andesíticas y basálticas en bloques, éstas se encuentran expuestas en las bases de El Picacho y El Jabalí y en afloramientos repartidos alrededor del volcán. El Picacho y El Jabalí constan principalmente de capas de rocas volcánicas que se sumergen más allá del centro del volcán, lo cual sugiere que estos dos picos son remanentes de un cono ancestral, el cual es llamado edificio volcánico de San Salvador. Actualmente, El Picacho y El Jabalí marcan la

ubicación de un edificio volcánico anterior que se ha cortado profundamente. Más allá del volcán, los afloramientos exponen secciones de una serie de depósitos de caídas de tefras andesíticas y basálticas. Algunos de estos depósitos de caídas de tefra tienen únicamente unos cuantos centímetros de grosor y se encuentran separados por superficies erosionadas, lo cual sugiere que son depósitos provenientes de muchas erupciones explosivas pequeñas que ocurrieron durante un intervalo de tiempo prolongado.

Un depósito gris característico de caída de pómez dacítica, conocida como la unidad G1, marca un episodio significativo de actividad explosiva en el volcán San Salvador. El depósito G1 es amplio y localmente tiene un grosor de más de un metro dentro de un radio de 10 kilómetros alrededor del cráter del volcán. Cerca de El Picacho, este depósito distintivo de caída se encuentra entre capas de depósitos de flujos y oleadas piroclásticas, además de depósitos múltiples de flujos y oleadas piroclásticas que se extienden a más de 6 kilómetros de la cumbre. Los fragmentos de roca dentro de estos depósitos de flujos y oleadas piroclásticas constan de las lavas más antiguas de San Salvador. La naturaleza y volumen (aproximadamente de 2 a 8 kilómetros cúbicos) de los depósitos de flujos y oleadas piroclásticas indican una erupción explosiva de grandes dimensiones que podría haber destruido significativamente el antiguo edificio de San Salvador, formando el cráter definido ahora por los picos de El Picacho y El Jabalí. Aunque se desconoce el tiempo exacto de este evento, las relaciones estratigráficas con depósitos de caídas de tefra provenientes de las erupciones de la caldera Ilopango, la cual se ubica en la parte este de las afueras de la ciudad de San Salvador, han ayudado a restringir el tiempo en que se produjo esta erupción. La unidad G1 descansa entre los depósitos de las caídas de tefra de la caldera Ilopango Tierra Blanca 3 (TB3) y Tierra Blanca 4 (TB4). Con base en los **paleosoles**, horizontes de tierra enterrada, formados sobre estos depósitos de tefra; se estima que TB4 tiene una edad aproximada de 40,000 a 50,000 años.

Las erupciones subsecuentes para el depósito de caída G1 produjeron flujos de lava y tefras que ahora llenan extensamente el cráter formado

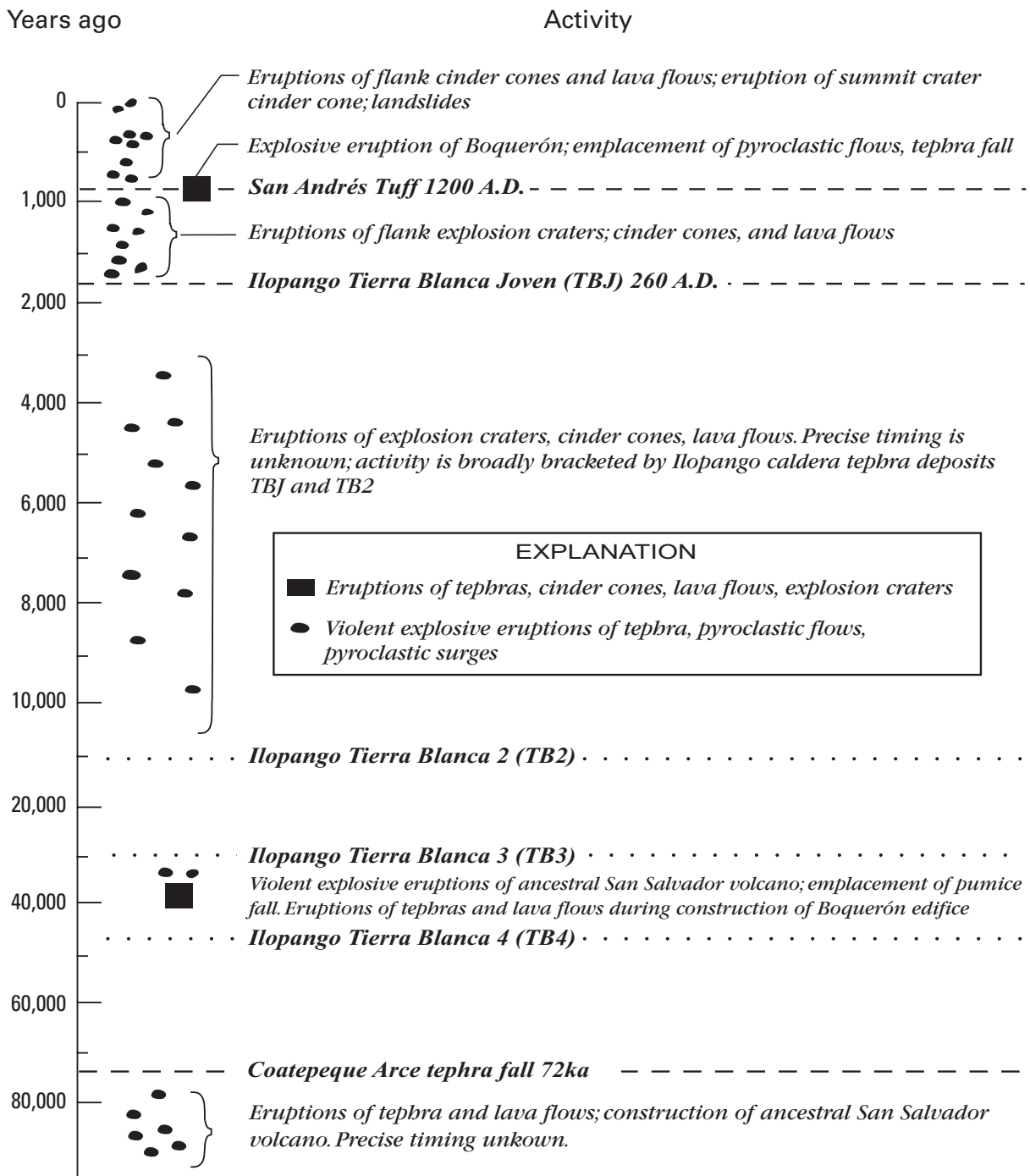


Figura 3. Resumen de la historia de erupciones del volcán San Salvador, basado ampliamente en Sofield (1998). La escala de tiempo es aproximadamente igual a años calendario. Los depósitos regionales de las caídas que tienen fechas conocidas se muestran con líneas cortadas, los depósitos de caídas regionales con fechas aproximadas se muestran con líneas punteadas.

durante la erupción G1 y forman un cono denominado El Boquerón. El Boquerón está compuesto de flujos de lava de bloques múltiples entre capas con depósitos de caídas de tefra, todos los cuales se distinguen químicamente de los flujos de lava del edificio ancestral de San Salvador. Los flujos de lava provenientes de El Boquerón se derramaron sobre los bordes norte, este y sur del edificio volcánico de San Salvador. Además de las erupciones provenientes del cráter central, se presentaron varias erupciones de los cráteres de explosión, conos de ceniza volcánica y flujos de lava más pequeños sobre los flancos del volcán.

El volcán El Boquerón explotó violentamente hace cerca de 800 años en una erupción que quizás fue similar, pero más pequeña, a la erupción que produjo el depósito de la caída G1. Los depósitos de caídas de tefra y flujo piroclástico, conocidos como toba San Andrés, se encuentran en los bordes de El Boquerón, además éstos depósitos se han correlacionado con depósitos similares, conocidos como la caída de tefra Talpetate, al flanco oeste del volcán San Salvador. A la tefra Talpetate se le ha asignado arqueológicamente una antigüedad de 1200 años D.C. En conjunto, los depósitos de la caída Talpetate y la toba San Andrés tienen un volumen cercano a los 0.5 kilómetros cúbicos, lo cual indica que esta erupción volcánica tuvo una dimensión de una décima parte de la erupción que produjo el depósito de la caída G1. Las estructuras sedimentarias en el depósito de la caída Talpetate sugieren que ésta se produjo por una erupción en la cual el magma interactuó con agua.

Algunas de las características volcánicas y depósitos más recientes en el volcán San Salvador se encuentran a lo largo de los flancos norte y noroeste del volcán. Las características y depósitos consisten de cráteres de explosión, conos de ceniza volcánica y flujos de lava que se encuentran concentrados generalmente a lo largo de dos zonas de falla prominentes. Varios de los cráteres de explosión se formaron entre los años 260 y 1200 D.C. Estos son más antiguos que los depósitos de la toba San Andrés, pero cubren el característico depósito de tefra Tierra Blanca Joven (TBJ), el depósito regional más reciente

asociado con las erupciones de la caldera Ilopango [4]. Muchos de estos cráteres de explosión muestran evidencia de que son producto de erupciones en las cuales el magma interactuó con agua.

Muchos de los conos de ceniza volcánica monogenéticos y sus flujos de lava asociados se encuentran sobre los flancos norte y noroeste del volcán San Salvador y más allá (ilustraciones 1 y 2). Muchos de estos conos de ceniza volcánica y flujos de lava son más recientes que el depósito de toba San Andrés, por lo que tienen una edad menor a los 800 años. Durante los pasados 500 años se han formado tres flujos de lava prominentes sobre y más allá del flanco noroeste del volcán San Salvador. Además de estos eventos volcánicos, se encuentran presentes depósitos de desprendimientos de tierra más recientes que la tefra Talpetate sobre los flancos norte y noroeste.

La actividad volcánica más reciente en San Salvador comenzó en Junio de 1917, cuando después de un temblor emergió una oleada de vapor del cráter de El Boquerón y se abrieron varias fisuras a lo largo del flanco noroeste del volcán. Después de un mes de esta actividad, se evaporó un lago dentro del cráter de El Boquerón, además de que se presentaron pequeñas explosiones que formaron el cono de ceniza volcánica denominado Boqueroncito. Esta erupción duró varios meses, provocó la formación del Boqueroncito y un flujo de lava extruído sobre el flanco noroeste del volcán. Después de la erupción de 1917, la actividad de las fumarolas continuó hasta finales de la década de los años 70.

Aunque no ha ocurrido actividad eruptiva en el volcán San Salvador por más de 80 años, si han ocurrido eventos letales relacionados con el volcán. En 1982 una lluvia copiosa ocasionó numerosos desprendimientos de tierra en El Salvador, en el volcán San Salvador se presentó un desprendimiento de tierra ocasionado por la misma lluvia en el flanco de El Picacho el cual corrió a lo largo de un canal y penetró la parte noroeste de la ciudad. El desprendimiento de tierra, que tenía un volumen de entre 200,000 a 300,000 metros cúbicos, se transformó rápidamente en un lahar que viajó más de 4 kilómetros desde su fuente. Cerca de la base del

volcán el lahar destruyó o enterró varias casas y provocó la muerte de entre 300 a 500 personas.

En los últimos 40,000 años (figura 3) han ocurrido más de 30 eventos volcánicos en el volcán San Salvador. Más aún, la frecuencia promedio aparente de las erupciones se estima en una cada 1300 años. Es indudable que el volcán ha presentado erupciones de manera más frecuente, pero algunas de estas erupciones no han dejado depósitos apreciables en el registro geológico. Si separamos los eventos eruptivos en periodos de tiempo discretos fácilmente determinables, entonces podemos establecer las siguientes frecuencias aparentes para las erupciones: Dentro del intervalo de hace 40,000 años y el año 260 D.C. 13 eventos identificables indican una frecuencia para las erupciones de aproximadamente un evento cada 3000 años. Dentro del intervalo de los años 260 al 1200 D.C. 9 eventos eruptivos identificables indican una frecuencia para las erupciones de aproximadamente un evento cada 100 años. Dentro del intervalo de los años 1200 D.C. al 1917, 9 eventos eruptivos identificables indican una frecuencia para las erupciones de aproximadamente un evento cada 80 años. Estas frecuencias para las erupciones son únicamente valores estadísticos promediados. Muchos de estos eventos eruptivos probablemente se encuentren asociados con un único episodio eruptivo, como erupciones de conos de ceniza volcánica y flujos de lava, en vez de ser eventos distintos con separaciones amplias en el tiempo. Las frecuencias de erupción aparentes no deben interpretarse en el sentido de que el tiempo entre erupciones necesariamente esta disminuyendo. La disminución aparente en el tiempo se relaciona principalmente a la mejor conservación de los depósitos más recientes. No obstante, aun tomando en cuenta las imperfecciones del registro geológico, la evidencia indica claramente que las erupciones del volcán San Salvador son suficientemente frecuentes, con una probabilidad anual de quizás 1 en 1000, como para tomar en cuenta seriamente el peligro potencial de futuras erupciones, dado que muchas zonas altamente pobladas se encuentran en riesgo.

ACTIVIDAD FUTURA EN EL VOLCÁN SAN SALVADOR

Con base en la actividad eruptiva durante los pasados 200 años, la futura actividad eruptiva en el volcán San Salvador podría involucrar erupciones violentas desde el cráter de la cumbre y probablemente presentaría explosiones relativamente pequeñas y caídas de tefra provenientes del cráter de la cumbre y centros monogenéticos además del emplazamiento de flujos de lava en o más allá de los flancos del volcán. El volcán ha presentado erupciones violentas al menos dos veces desde el cráter central de la cumbre, una en fechas tan recientes como hace 800 años la cual podría presentarse de la misma forma en el futuro. Las erupciones explosivas son más peligrosas que aquellas que generan flujos de lava o conos de ceniza volcánica. Dichas erupciones explosivas pueden producir flujos y oleadas piroclásticas que afectan simultáneamente múltiples sectores del volcán, así como producir caídas de tefra y lahares de gran grosor que podría afectar áreas de más de 10 kilómetros desde el volcán. Si el magma que emerge dentro del volcán o en las cercanías de un centro monogenético interactúa con el agua subterránea o el agua superficial absorbida, esto podría producir enérgicas explosiones de vapor y oleadas piroclásticas destructivas. Los desprendimientos de tierra y lahares, iniciados por alguno de los diversos mecanismos, pueden ocurrir sobre cualquier flanco del volcán.

Los principales efectos de las futuras erupciones o desprendimientos de tierra probablemente se confinarán dentro de aproximadamente 10 kilómetros alrededor de la cumbre del volcán. Sin embargo, los lahares de mayores dimensiones pueden viajar más de 10 kilómetros lejos de la cumbre, los centros monogenéticos podrían presentar erupciones con radios mayores a los 10 kilómetros y las caídas de tefra copiosas podrían desplazarse más allá de los 10 kilómetros a favor del viento.

Los patrones de viento de nivel superior en Guatemala a altitudes de entre 3000 a 15,000 metros de altura dependen enormemente de las estaciones del año [5]. En EL Salvador se encuentran patrones de viento similares. De enero a marzo dominan los vientos del oeste. Abril y mayo son meses de transición en los cuales los vientos del oeste dan paso a los provenientes del norte y el este. El periodo de junio a octubre se caracteriza por los vientos del este, mientras que noviembre y diciembre son meses de transición durante los cuales los vientos del oeste gradualmente se vuelven predominante. La fuerte dependencia de las estaciones del año sobre estos vientos tendrá influencia en las áreas afectadas por las caídas de tefra. Las tefras provenientes de las erupciones probablemente caigan al este del volcán de enero a marzo, cubriendo potencialmente regiones amplias al este, sur y oeste en abril y mayo, afectando las áreas del lado oeste del volcán de junio a octubre y posiblemente las áreas al oeste, norte y este del volcán en noviembre y diciembre. Los vientos superficiales podrían afectar también las distribuciones de tefra; además de depender de las estaciones del año sus patrones también son diurnos [5]. Por lo tanto, todos los sectores alrededor del volcán San Salvador pueden verse afectados por las caídas de tefra, sin embargo es más probable que algunas áreas sean afectadas dependiendo de la estación del año en la cual ocurre la erupción.

Los principales efectos de las erupciones y desprendimientos de tierra son serios, pero los efectos secundarios pueden ser asimismo severos, pueden afectar áreas más allá de la zona del impacto principal además de que pueden persistir por varios años. Dichos efectos secundarios, que se asocian principalmente con el sedimento depositado en los canales de los ríos por los desprendimientos de tierra y lahares, involucran la remoción y redistribución del sedimento, la erosión de la ribera, la pérdida de la capacidad del canal además de agudizar los riesgos de inundaciones en las áreas bajas. Los efectos secundarios que pueden ocurrir como secuelas de una erupción del volcán San Salvador o un desprendimiento de tierra apreciable pueden afectar áreas de muchas decenas de kilómetros aguas abajo del volcán.

EVENTOS EN OTROS VOLCANES QUE PUEDEN AFECTAR LA REGIÓN DE SAN SALVADOR

El volcán San Salvador y los escapes cercanos no son las únicas fuentes de riesgos volcánicos dentro de la región. Los eventos volcánicos más devastadores que han afectado a la región de San Salvador se relacionan a las erupciones explosivas de mayores dimensiones provenientes de la caldera Ilopango, la cual se ubica al este de los suburbios de la ciudad de San Salvador (figura 1). Cuatro erupciones explosivas de esta caldera ocurridas en el pasado hace unos 40,000 a 50,000 años han dejado depósitos de caídas de tefra y flujos piroclásticos que tienen varios metros de grosor en la región de San Salvador. Los depósitos de las erupciones explosivas más recientes provenientes de Ilopango, la unidad regional Tierra Blanca Joven (TBJ), se fechan en el año 260 D.C. [4]; estos depósitos se extienden varios kilómetros al este del volcán San Vicente (figura 1) a varios kilómetros al oeste y noroeste del volcán San Salvador. Dichas erupciones catastróficas de grandes dimensiones en Ilopango ocurrieron aproximadamente una vez cada 10,000 a 15,000 años durante los pasados 40,000 a 50,000 años, de tal modo que la probabilidad anual de otra erupción de esta magnitud en Ilopango es muy baja. Dependiendo de la estación del año y de las direcciones de los vientos prevalecientes, la tefra proveniente de las erupciones de otros volcanes, como el Santa Ana, San Vicente o San Miguel (figura 1), por ejemplo, podrían afectar la región de San Salvador.

MAPAS DE ZONAS DE RIESGO VOLCÁNICO

Los mapas de ubicación de las zonas de riesgo volcánico adjuntos (ilustraciones 1 y 2) muestran áreas que podrían verse afectadas por futuros eventos geológicos de riesgo en o cerca del volcán San Salvador. Los eventos individuales afectan típicamente sólo a una parte de la zona de riesgo. La ubicación y dimensiones de un área afectada dependerá de la localización de un escape eruptivo o un desprendimiento de tierra, el volumen de

material involucrado y el carácter de una erupción, especialmente su grado de explosión.

Las áreas de riesgo potencial alrededor del volcán San Salvador se dividen en zonas de riesgo volcánico proximal, lahar y volcánica regional dependiendo de la distancia al volcán y del tipo de riesgo. Las zonas de riesgo de lahar se subdividen a su vez con base en su grado de riesgo relativo en lahares de varios volúmenes. Los límites de la zona de riesgo se determinan con base en (1) la magnitud de los eventos pasados del volcán, tal como se han inferido a partir de los depósitos; (2) los modelos matemáticos que utilizan calibraciones de otros volcanes para predecir la magnitud más probable de los lahares y (3) nuestra experiencia y juicios derivados de las observaciones y comprensión de estos eventos en volcanes similares.

Aunque mostramos límites fijos para las zonas de riesgo, la frontera de las zonas de riesgo no termina repentinamente en estos límites. Más bien, el riesgo disminuye gradualmente a medida que aumenta la distancia al volcán; para los lahares disminuye rápidamente a medida que aumenta la elevación sobre los pisos del canal. Las áreas inmediatamente fuera de las zonas de riesgo no deben considerarse como libres de riesgo, debido a que los límites del riesgo sólo pueden ubicarse de manera aproximada, especialmente en áreas de relieves bajos. La incertidumbre existente con respecto a la fuente, dimensiones y movilidad de los futuros eventos impide la ubicación precisa de los límites para las zonas sin riesgo. Más aún, únicamente mostramos aquellos riesgos asociados con los eventos originados en San Salvador y los volcanes distales de tipo monogenético. Los eventos que no se encuentran directamente asociados con la actividad del volcán San Salvador o de los volcanes monogenéticos de los alrededores podrían incrementar los riesgos dentro de las zonas de bajo riesgo aparente de las ilustraciones 1 y 2. Un buen ejemplo de esto es el letal desprendimiento de tierra de enero de 2001 proveniente de la cordillera del Bálsamo, ubicada al sur del volcán San Salvador, la cual devastó el vecindario de Las Colinas cercano a Nueva San Salvador. La ilustración 1 muestra esta área con un grado relativamente bajo de riesgo con respecto a los desprendimientos de tierra y lahares que se

originan en el volcán San Salvador. Las Colinas y otras comunidades en la base de la cordillera empinada al sur del volcán se ubican claramente en un área de riesgo geológico, pero los riesgos de los desprendimientos de tierra regionales no se encuentran definidos en nuestro análisis de los eventos relacionados con el volcán.

Los usuarios de los mapas de riesgo en este reporte deberán estar consientes que los mapas no muestran todas las áreas de riesgo sujetas a los desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Salvador. El volcán presenta incisiones extensas por lo que los desprendimientos de tierra pueden ocurrir en cualquier drenado. Para este reporte hemos definido zonas de inundación a partir de lahares de varios volúmenes para los canales más importantes que se dirigen directamente a las áreas pobladas. Otros canales para los cuales no hemos modelado la inundación por lahares no deben considerarse como áreas libres de riesgos. Los desprendimientos de tierra y lahares provenientes de otros canales no mostrados en el mapa podrían asimismo amenazar la vida y la propiedad de los pobladores.

Zona de riesgo volcánico proximal

La zona de riesgo volcánico proximal incluye áreas que rodean inmediatamente al volcán San Salvador, se extiende alrededor de 5 a 7 kilómetros desde la cumbre dependiendo de la topografía local [6]. Esta zona delinea las áreas sujetas a los fenómenos volcánicos devastadores incluyendo flujos y oleadas piroclásticas, avalanchas de escombros, flujos de lava y balísticos. Debido a la elevada velocidad y capacidad de destrucción de muchos de estos fenómenos, poder escapar o sobrevivir a ellos es poco probable en la zona de riesgo proximal. Por ello la evacuación de estas zonas de riesgo durante los periodos de actividad del volcán es una solución realista y la única forma de proteger la vida de los pobladores. Las avalanchas de escombros y lahares se originarán en el área proximal y los depósitos provenientes de flujos y desprendimientos pequeños pueden restringirse a esta zona. Sin embargo las avalanchas de

escombros y lahares de grandes dimensiones viajarán más allá del volcán y fluirán sobre las tierras bajas adyacentes. La extensión de la inundación de los lahares de varios volúmenes es la base para la definición de las zonas de riesgo para los lahares.

Zonas de riesgo por lahar

Las zonas de riesgo de lahar descansan a lo largo de los canales principales que drenan al volcán San Salvador. Dependiendo de la distancia al volcán, estas áreas se verán afectadas de unos cuantos minutos a una hora después del comienzo de un lahar. Más allá de 10 kilómetros de la cumbre del volcán el escape podría ser posible si la gente recibe las alarmas suficientes. Dentro de los 10 kilómetros alrededor del volcán los lahares se producen demasiado rápido como para poder brindar señales de alarma efectivas.

Utilizamos una técnica matemática calibrada con datos provenientes de otros volcanes [7] para estimar las áreas potenciales de inundación provenientes de los lahares de varios volúmenes. Para cada canal analizado, definimos de cuatro a cinco zonas de riesgo anidadas que describen la inundación de manera anticipada por medio de un diseño hipotético de los lahares que tienen diferentes volúmenes. El lahar con el diseño más extenso, de 2 millones de metros cúbicos, refleja nuestra estimación del lahar de las mayores dimensiones posibles generado por una avalancha de escombros que deben descender repentinamente del volcán San Salvador [7]. Sin embargo, una avalancha de escombros del volumen suficiente como para generar un lahar de este tamaño requiere la falla de una gran parte del flanco superior del volcán, y dicho evento podría restringirse al flanco este del volcán [7]. Por ello utilizamos un millón de metros cúbicos como nuestro diseño para el lahar de mayores dimensiones provenientes de otras áreas fuente. Las avalanchas de escombros de un millón de metros cúbicos o más requieren fallas catastróficas de piezas relativamente grandes del volcán, pero las avalanchas de este tamaño pueden ocurrir sobre cualquier flanco del volcán. Las avalanchas pueden ocurrir junto con la actividad volcánica, como la intrusión de magma dentro del edificio, el

cual podría detectarse por medio de la supervisión adecuada. Sin embargo, la posibilidad de fallas prominentes en el flanco podría iniciarse por mecanismos distintos a la intrusión de magma, como temblores fuertes o lluvias torrenciales, los cuales no pueden desestimarse. En general, los desprendimientos de tierra y lahares iniciados por mecanismos distintos a la actividad volcánica probablemente tengan volúmenes menores a un millón de metros cúbicos.

Los diseños de lahar intermedios (300,000 a 500,000 metros cúbicos) y los más pequeños (100,000 metros cúbicos) son volúmenes de lahar más típicos para una erupción de pequeña a moderada o para un desprendimiento de tierra que ocurre sin señales de advertencia. Los lahares de estos tamaños se han presentado históricamente en San Salvador y otros volcanes en El Salvador, los lahares de estos tamaños y más pequeños son los que tienen mayor probabilidad de presentarse de nuevo.

El que se presenten lahares de grandes dimensiones es menos probable que los lahares más pequeños. Así, las zonas de riesgos de lahar anidadas muestran que la probabilidad de una inundación lahar disminuye a medida que aumenta la distancia al volcán y la elevación por encima del piso del valle. De acuerdo a nuestro conocimiento, no se han presentado lahares de más de un millón de metros cúbicos en el volcán San Salvador. La probabilidad anual de un lahar de este tamaño es muy difícil de estimar, pero posiblemente sea menor a 1 en 40,000 [8]. Los desprendimientos de tierra y lahares de menor tamaño iniciados por temblores de tierra o lluvias torrenciales son más probables pero únicamente inundarían partes de las zonas de riesgo, del diseño, adyacentes a los canales de la corriente. Los lahares de aproximadamente 300,000 metros cúbicos o menos podrían tener una probabilidad anual cercana a 1 en 100, o quizás tan grande como 1 en 10 [8].

En general, las zonas de riesgo de lahar se encuentran dentro de los 10 kilómetros alrededor del cráter de la cumbre. Incluso los diseños de lahar de mayor volumen, de más de 2 millones de metros cúbicos, no se extienden más allá de 15 kilómetros del cráter de la cumbre. La topografía local juega un papel preponderante en el control

del recorrido del lahar. Aunque un desprendimiento de tierra o lahar, se origina y fluye a lo largo de drenados profundamente cortados sobre los flancos del volcán, estos canales se hacen menos profundos de manera abrupta y la topografía se aplanan cerca de la base del edificio. Como resultado, los lahares se derraman rápidamente fuera de los canales, se dispersan y se detienen. Las zonas de riesgo más distantes se encuentran asociadas con canales con incisiones profundas en los cuales los lahares permanecerán confinados, como en los sectores del suroeste y noreste del edificio. A pesar de sus relativamente cortas distancias de recorrido, incluso los lahares más pequeños podrían ser devastadores. La ciudad de San Salvador y las comunidades circundantes han invadido los flancos bajos del volcán y las zonas de riesgo de lahar se extienden dentro de áreas con asentamientos ahora densamente poblados.

Zona de riesgo volcánico regional

Las erupciones de los conos monogenéticos más allá de los flancos del volcán San Salvador han afectado áreas alejadas a más de 10 kilómetros de la cumbre del volcán. Las erupciones de estos escapes monogenéticos han producido flujos de lava, oleadas piroclásticas, proyectiles balísticos y caídas de tefra. Mucha de esta actividad ha ocurrido al norte y noroeste del volcán San Salvador. Definimos una zona de riesgo volcánico regional (ilustración 2) determinando la distribución de los escapes monogenéticos dentro del área y considerando que los futuros escapes y fisuras harán erupción únicamente dentro de esta área. Se considera que los flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas y proyectiles balísticos producidos por las erupciones de estos centros monogenéticos viajarán a una distancia máxima de 5 kilómetros de su escape fuente. Por ello, hemos establecido un límite para la zona de riesgo ya sea de 5 kilómetros, pendiente abajo, desde donde se abren estos escapes, o donde las características topográficas significativas posiblemente detengan o desvíen los flujos de lava. La zona de riesgo regional comprende zonas altamente pobladas. Una erupción de un escape monogenético dentro de esta zona causaría daños sociales significativos,

debido a que los flujos de lava, flujos y oleadas piroclásticas destruirían todo a su paso.

Al menos 8 flujos de lava han ocurrido en los últimos 1700 años, lo cual sugiere que la probabilidad anual de un flujo de lava local en el área norte o noroeste del volcán es de aproximadamente 1 en 200. Sin embargo, debido a que únicamente un parte relativamente pequeña de la zona de riesgo regional estará afectada durante cualquier episodio eruptivo determinado y debido a que partes extensas dentro de la zona de riesgo nunca han sido cubiertas por flujos de lava, la probabilidad anual para un punto específico dentro de la zona inundada por un volcanismo renovado es de menos de 1 en 200.

ADVERTENCIAS Y PRONÓSTICOS DE RIESGO

Los científicos normalmente pueden reconocer y vigilar varios indicadores de erupciones volcánicas inminentes. El magma que emerge dentro del volcán antes de una erupción puede provocar cambios que usualmente son detectados por varios instrumentos geofísicos y por medio de observaciones visuales. Se generan grupos de pequeños temblores a medida que se rompe la roca para dejar espacio para el magma emergente o a medida que el calentamiento de los fluidos incrementa la presión subterránea. El calor proveniente del magma puede aumentar la temperatura del agua interior y elevar la temperatura de los brotes de agua caliente y el vapor proveniente de las fumarolas; asimismo pueden generar explosiones de vapor de tamaño reducido. La composición y volumen de los gases emitidos por las fumarolas pueden cambiar a medida que el magma se acerca a la superficie, además que la inyección de magma dentro del volcán puede causar hinchamientos u otros tipos de deformación superficial.

El Salvador tiene una red sísmica nacional, de modo que un grupo significativo de temblores en el volcán San Salvador podría notarse rápidamente. En otros volcanes similares a San Salvador, ha ocurrido un aumento significativo en la actividad sísmica días o meses antes de las erupciones. Un aumento en la actividad sísmica cerca del volcán podría activar la colocación

inmediata de sismómetros adicionales para ubicar mejor los temblores y estimular otros esfuerzos de vigilancia para examinar los signos de la actividad volcánica.

Los periodos de actividad volcánica producen tiempos de gran incertidumbre. Durante las pasadas décadas se han efectuado avances sustanciales en la supervisión del volcán y pronósticos de erupción, pero todavía los científicos sólo pueden realizar afirmaciones muy generales con respecto a la probabilidad, tipo y escala de una erupción inminente. La actividad precursora puede pasar por fases de aceleración y desaceleración y en ocasiones pueden agotarse sin una erupción. Los funcionarios gubernamentales y la población deben estar consientes de las limitaciones en el pronóstico de las erupciones y deben estar preparados para enfrentar dicha incertidumbre.

A pesar de los avances en la supervisión del volcán y del pronóstico de las erupciones, todavía es difícil sino es que imposible, predecir de manera precisa que sucedan desprendimientos de tierra iniciados por temblores o lluvias torrenciales. Por ello, los funcionarios gubernamentales y la población necesitan identificar la ubicación de las zonas de riesgo de lahar y estar consientes de los eventos letales potenciales que pueden presentarse en estas zonas de riesgo con pocas o ninguna señal de advertencia.

PROTECCIÓN A LAS COMUNIDADES Y CIUDADANOS EN CONTRA DE LOS RIESGOS RELACIONADOS AL VOLCÁN

Las comunidades, negocios y ciudadanos deben efectuar planes por adelantado para mitigar los efectos de futuras erupciones volcánicas, desprendimientos de tierra y lahares provenientes del volcán San Salvador. Los esfuerzos de mitigación a largo plazo deben incluir el uso de información acerca de los riesgos del volcán cuando se toman decisiones con respecto al uso del suelo y el establecimiento de las instalaciones críticas. Los desarrollos futuros deben evitar las

áreas que se juzgue que tengan un riesgo altamente inaceptable o deberán planearse y diseñarse para reducir dicho nivel de riesgo.

Cuando los volcanes amenazan con hacer o hacen erupción, se necesita una respuesta rápida y perfectamente bien coordinada. Esta respuesta será más efectiva si los ciudadanos y funcionarios públicos tienen una comprensión básica de los riesgos del volcán y han planeado las acciones necesarias para proteger a las comunidades.

Debido a que una erupción volcánica puede ocurrir unos días o meses después de la primera actividad precursora y debido a que algunos eventos de riesgo, tales como lahares o desprendimientos de tierra, pueden ocurrir sin advertencias, se deben establecer por adelantado los planes de emergencia apropiados. Aunque han transcurrido más de 80 años desde la última erupción del volcán San Salvador y se desconoce cuando volverá a hacer erupción, los funcionarios públicos necesitan considerar aspectos como la educación pública, la planeación del uso del suelo, las estrategias de advertencia y comunicación así como las evacuaciones como parte de su plan de respuesta. Los planes de emergencia ya desarrollados para las inundaciones pueden aplicarse en alguna medida, pero necesitan modificaciones para los riesgos derivados de los lahares. En el caso de evacuaciones, para las poblaciones en las áreas bajas también es útil un mapa que muestre la ruta más corta hacia las zonas más elevadas.

El conocimiento y la planeación por adelantado son los aspectos más importantes para enfrentar los riesgos de un volcán. Es especialmente importante contar con un plan de acción basado en el conocimiento de las áreas relativamente seguras alrededor de los hogares, escuelas y sitios de trabajo. Todos los riesgos volcánicos descritos en este reporte son serios, además de que muchos y distintos fenómenos de riesgo podrían afectar un área que se extiende a una distancia de unos 7 kilómetros desde la cumbre del volcán San Salvador. Los lahares representan la mayor amenaza para la gente que vive, trabaja o se recrea a lo largo de los canales que drenan al volcán San Salvador, incluso a distancias de hasta 15 kilómetros del volcán. La mejor estrategia para evitar un lahar es moverse a

las zonas más elevadas posibles. Una altura segura por encima de los canales de un río depende de muchos factores entre los que se incluyen el tamaño del lahar, la distancia desde el volcán y la forma del valle. Para las áreas alejadas a más de 10 kilómetros de la cumbre del volcán, todos los lahares, menos los de mayores dimensiones, se elevarán menos de 20 metros por encima del fondo del canal. El volcán de San Salvador hará erupción de nuevo y la mejor manera de enfrentar las futuras erupciones es a través de una planeación por adelantado con la finalidad de mitigar sus efectos.

REFERENCIAS

- Bäcklin, C. and Finnson, H., 1994, Landslide hazard at the San Salvador volcano: M.S. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 136 p.
- Baum, R.L., Crone, A.J., Escobar, D., Harp, E.L., Major, J.J., Martinez, M., Pullinger, C.R., and Smith, M.E., 2001, Assessment of landslide hazards resulting from the February 13, 2001, El Salvador earthquake: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-119, 22 p.
- Hart, W.J.E., and Steen-McIntyre, V., 1983, Tierra Blanca Joven tephra from the A.D. 260 eruption of Ilopango caldera, in Sheets, P.D., ed., *Archeology and Volcanism in Central America*: University of Texas Press, Austin, p. 14-34.
- Hayashi, J.N., and Self, S., 1992, A comparison of pyroclastic flow and debris avalanche mobility: *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 9063-9071.
- Iverson, R.M., Schilling, S.P., and Vallance, J.W., 1998, Objective delineation of lahar-hazard zones downstream from volcanoes: *Geological Society of America Bulletin*, v. 110, p. 972-984.
- Major, J.J., Pierson, T.C., Dinehart, R.L., and Costa, J.E., 2000, Sediment yield following severe volcanic disturbance—a two decade perspective from Mount St. Helens: *Geology*, v. 28, p. 819-822.
- Malin, M.C., and Sheridan, M.F., 1982, Computer-assisted mapping of pyroclastic surges: *Science*, v. 217, p. 637-640.
- Mercado, R., Rose, W.I., Najera, L., Matías, O., and Girón, J., 1988, Volcanic ash fall hazards and upper wind patterns in Guatemala, preliminary report: Publication of Department of Geological Engineering and Sciences, Michigan Technological University: Houghton, MI, 34 p.
- Portig, W.H., 1976, The climate of Central America, in Schwerdtfeger, W., ed., *World Survey of Climatology, Climates of Central and South America*, v. 12: Elsevier, New York, p. 405-478.
- Rose, W.I., Conway, F.M., Pullinger, C.R., Deino, A., and McIntosh, W.C., 1999, An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America: *Bulletin of Volcanology*, v. 61, p. 106-120.
- Rymer, M.J., and White, R.A., 1989, Hazards in El Salvador from earthquake-induced landslides, in Brabb, E.E., and Harrod, B.L., eds., *Landslides: Extent and Economic Significance*. Balkema, Rotterdam, p. 105-109
- Sofield, D.J., 1998, History and hazards of Volcán San Salvador, El Salvador: M.S. thesis, Michigan Technological University, 116 p.

LECTURAS ADICIONALES SUGERIDAS

- Blong, R.J., 1984, *Volcanic hazards*: Academic Press, Orlando, FL., 424 p.
- Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S.R., Rymer, H., and Stix, J., eds., 2000, *Encyclopedia of Volcanoes*: Academic Press, San Diego, CA., 1417 p.
- Tilling, R.I., ed., 1989, *Volcanic hazards: Short course in geology*, v. 1, American Geophysical Union, Washington, D.C., 123 p.

NOTAS FINALES

- [1] Los datos geológicos sobre los que se basa este reporte provienen principalmente de Sofield (1998); Bäcklin y Finnson (1994); comunicaciones con el personal del Centro de Investigaciones Geotécnicas de San Salvador; además de nuestras propias investigaciones de reconocimiento.

- [2] Diario de Hoy reportó emisiones de gas, lluvia ácida y daños a los cultivos en las plantaciones de café alrededor del volcán Santa Ana, en un artículo publicado el 19 de Enero de 2001.
- [3] Los análisis de los datos limitados provenientes de los volcanes alrededor del mundo indican que los yacimientos de sedimentos provenientes de los canales de río llenos con escombros de una erupción pueden permanecer más altos que los niveles de fondo típicos para los años o décadas posteriores a una erupción. En algunos casos los yacimientos de sedimento pueden ser de 10 a 100 veces mayores a los niveles de fondo típicos por más de dos décadas (Major et al, 2000). Los canales de río altamente obstruidos con sedimentos típicamente son inestables. La deposición elevada de sedimentos causa que un río se desvíe a lo largo del piso del valle, lo cual puede iniciar una erosión significativa de la ribera que posteriormente se sumará a la carga de sedimentos del río.
- [4] Las edades de las erupciones provenientes de las calderas de sílice más grandes en Centroamérica las proporciona Rose et al. (1999). Hart y Steen-McIntyre (1983) proporcionan una discusión detallada de la tefra Tierra Blanca Joven (TBJ) proveniente de la caldera Ilopango.
- [5] Los patrones de viento de los niveles altos en Guatemala los proporciona Mercado et al. (1988). Porting (1976) proporciona los patrones de viento superficial y diurno en San Salvador.
- [6] La extensión máxima de la zona de riesgo volcánico proximal se estima a partir de la fórmula $H/L = 0.2$, en donde H es la diferencia de elevación entre el borde de la cumbre de El Boquerón y la línea del límite de riesgo, mientras que L es la distancia horizontal desde el centro del cráter de la cumbre hasta la línea del límite de riesgo (véase por ejemplo Malin y Sheridan, 1982; Hayashi y Self, 1992; e Iverson et al., 1998). El valor 0.2 se seleccionó debido a que comprende aproximadamente la extensión distal de las lavas erupcionadas desde el área central de la cumbre, además de que es consistente con las proporciones H/L para el fenómeno de riesgo proximal en muchos otros volcanes.
- [7] Las zonas de riesgo por lahar se construyeron por medio del modelado de los volúmenes de lahar de 100,000; 300,000; 500,000 y un millón de metros cúbicos y de 2 millones de metros cúbicos sobre el flanco este del volcán. Utilizando técnicas matemáticas y de cartografía digital (Iverson et al., 1998), estos volúmenes se utilizaron para calcular la extensión estimada de la inundación aguas abajo desde el área fuente. Para los desprendimientos de tierra históricos provenientes del volcán San Salvador se han estimado volúmenes de hasta 300,000 metros cúbicos (Bäcklin y Finnson, 1994; Centro de Investigaciones Geotécnicas, comunicación personal); para los desprendimientos de tierra regionales originados por temblores o lluvias se han estimado volúmenes de más de 10 millones de metros cúbicos, sin embargo la mayoría de los desprendimientos de tierra originados por estos mecanismos han tenido volúmenes que van de unos cuantos cientos a decenas de miles de metros cúbicos (Rymer y White, 1989; Baum et al., 2001; E. L. Harp y A. J. Crone, U. S. Geological Survey, comunicación personal). En el volcán Casita en Nicaragua, una lluvia extremadamente torrencial proveniente del huracán Mitch originó un desprendimiento con un volumen cercano a los 1.5 millones de metros cúbicos, sin embargo a medida que se movió pendiente abajo se transformó en un lahar que desgastó su canal con un volumen de más de 3 millones de metros cúbicos (K. M. Scott, U. S. Geological Survey, comunicación personal). Considerando estos datos, seleccionamos un desprendimiento de tierra y un lahar asociado de un millón de metros cúbicos como el tamaño máximo posible a producirse en la mayoría de los canales en el volcán San Salvador por temblores o lluvias torrenciales. Localmente hemos utilizado un diseño de lahar de mayores dimensiones, tal como lo hemos anotado más adelante.
- Un volumen de 10 millones de metros cúbicos se considera como el mayor tamaño posible para una avalancha de escombros proveniente del volcán San Salvador, basándose en la siguiente analogía para la avalancha de escombros del Monte Santa Helena y otros argumentos geológicos. La avalancha en 1980 del Monte Santa Helena removió aproximadamente 2300 millones de metros

cúbicos del flanco norte del volcán, el cual tenía una inclinación promedio de cerca de 30 grados. Esta avalancha removió cerca del 25% del volumen total del cono por encima de la altura a la cual el plano de la falla cruzó el flanco norte inferior. En contraste con el Monte Santa Helena, el volcán San Salvador tiene un amplio perfil topográfico en el que, con excepción de El Picacho, muy pocas pendientes exceden los 20 grados. En El Picacho las pendientes por encima de los 1400 metros de altitud igualan o exceden los 30 grados, además de que el volumen por encima de los 1400 metros es cercano a los 950 millones de metros cúbicos. Si el valor del 25% del Monte Santa Helena se aplicase a San Salvador, entonces el volumen máximo de una avalancha de escombros de grandes dimensiones, proveniente de El Picacho, sería ligeramente mayor a los 200 millones de metros cúbicos. Sin embargo, la analogía con el Monte Santa Helena es para avalanchas de escombros originadas por la intrusión magmática local. El Picacho se encuentra separado de manera significativa del cráter central de San Salvador, está compuesto de flujos de lava relativamente inalterados, además de que es poco probable que produzca una avalancha de escombros de grandes dimensiones a menos que el volcán experimente una deformación extrema. Es probable que ocurra intrusión de magma en el futuro en el escape central o a lo largo de las zonas de falla débiles sobre el flanco noroeste del volcán en vez de en la parte baja de El Picacho. A nuestro juicio, una mejor estimación de las avalanchas de escombros más grandes que podría provenir de El Picacho es quizás del orden de 10 millones de metros cúbicos, un volumen similar a un desprendimiento de tierra reciente originado por un temblor a lo largo del Río Jiboa cercano al volcán San Vicente (Baum et al., 2001). El volcán San Salvador no tiene una historia geológica que muestre la producción de desprendimientos de tierra de grandes dimensiones y muchos de los desprendimientos de tierra más grandes generados a través del país por los temblores fuertes en el año 2001 fueron menores a un millón de metros cúbicos (E. L. Harp y A. J. Crone, U. S. Geological Survey, comunicación personal). Aunque

limitamos las probables avalanchas de escombros más grandes a los 10 millones de metros cúbicos, creemos que un lahar de este volumen es poco probable que fluya aguas abajo sobre un canal único. El flanco este del volcán San Salvador está profundamente estriado con canales cercanamente espaciados. De ese modo, es probable que las avalanchas de escombros de grandes dimensiones se dispersen entre varios canales. De acuerdo con esto hemos seleccionado el volumen de 2 millones de metros cúbicos como el mayor volumen que podría viajar sobre un solo canal proveniente de El Picacho.

- [8] La probabilidad anual de un lahar que tenga un volumen igual o mayor a un millón de metros cúbicos proveniente del volcán San Salvador es menor a 1 en 40,000. Estimamos esta probabilidad con base a la observación de que no se han encontrado depósitos provenientes de lahar de este tamaño en el registro geológico al menos desde el tiempo de la erupción explosiva que emplazó la caída de tefra G1 hace aproximadamente 40,000 a 50,000 años. Estimamos que las probabilidades anuales de los desprendimientos de tierra y lahares que tienen volúmenes cercanos a los 300,000 metros cúbicos o menos son como se indica a continuación. Los desprendimientos de tierra históricos inducidos por temblores han ocurrido a través de El Salvador en al menos una docena de veces de 1857 al 2001 (Rymer y White, 1989; Baum et al., 2001). Los volúmenes de estos desprendimientos de tierra van de unos cuantos de cientos a más de 10 millones de metros cúbicos, pero la mayoría tienen volúmenes de menos de unos cuantos a decenas de miles de metros cúbicos. Así, los desprendimientos de tierra inducidos por temblores de volúmenes pequeños a moderados ocurren en El Salvador aproximadamente una vez cada 12 años. En el volcán de San Salvador, la lluvia que inició el desprendimiento de tierra de aproximadamente 300,000 metros cúbicos en 1982 fue la de mayores dimensiones registrada en algunas estaciones y cercanamente igual a las de mayores dimensiones en los registros de otras estaciones. El registro de la precipitación más grande en el área es de hace más de 50 años (Bäcklin y Finnson, 1994). Por lo tanto, el lahar y desprendimiento de tierra de 1982 quizás tuvo una probabilidad anual de menos

de 1 en 50. Sin embargo, un desprendimiento de tierra de dimensiones similares ocurrió en un barranco adyacente en algún momento en los años 40 (Centro de Investigaciones Geotécnicas, comunicación personal). En el volcán San Vicente, los lahares y desprendimientos de tierra de volúmenes comparables han ocurrido al menos en cuatro ocasiones en los últimos 225 años, además de al menos tres veces en los últimos 65 años, esto sugiere que dichos eventos podrían tener una

probabilidad anual para su ocurrencia cercana a 1 en 60 y 1 en 20. Aunque estas probabilidades están enormemente generalizadas a lo largo de la región en vez de ser específica para el volcán San Salvador, concluimos que la probabilidad anual de los desprendimientos de tierra y lahares con dimensiones de 300,000 metros cúbicos en el volcán San Salvador es de aproximadamente 1 en 100 y quizás con un valor máximo de 1 en 10.



Printed on recycled paper

