



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

MEMORIA

**Seminario virtual Volcán de San Salvador.
Más que majestuoso, un volcán enigmático.**

3-6 de mayo 2021





MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

MEMORIA

**Seminario virtual Volcán de San Salvador.
Más que majestuoso, un volcán enigmático.**

3-6 de mayo 2021

MEMORIA Seminario Volcán San Salvador, más que majestuoso un volcán enigmático.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)
El Salvador, Centroamérica.

Fernando Andrés López Larreynaga
Ministro

Luis Eduardo Menjívar Recinos
Director del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.

Coordinación
Douglas Antonio Hernández Castillo.

Compilación
Angela Valeria García Lara, especialista en geología.

Edición, diagramación y/o diseño
Gerencia de Comunicaciones

Primera edición
Julio 2022

Este documento puede ser reproducido todo o en parte, reconociendo los derechos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Kilómetro 5 ½ carretera a Santa Tecla, calle y colonia Las Mercedes, Edificios MARN, instalaciones ISTA, San Salvador, El Salvador, Centroamérica.

Teléfono: (503) 2132-6276
Sitio web: www.marn.gob.sv
Correo electrónico: medioambiente@marn.gob.sv
Facebook: /MedioAmbienteSLV/
Twitter: @MedioAmbienteSV
Youtube: [youtube/MARNsv](https://www.youtube.com/MARNsv)
Instagram: @medioambientesv

Contenido

Introducción	5
Objetivos	6
Capítulo I. Antropología y arqueología	7
Capitulo II. Contexto Geocientífico	18
Capitulo III. Amenazas Geológicas	104
Capitulo IV. Monitoreo Volcánico	143
Capítulo V. Uso de suelo y Geoconservación.	160



Introducción

La Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales desarrolló el seminario: **“Volcán de San Salvador, más que majestuoso, un volcán enigmático”** durante los días 3 al 6 de mayo de 2021, como iniciativa para la integración, difusión y apropiación del conocimiento relacionado con el Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS), impulsando el desarrollo de investigaciones conjuntas entre los sectores privados, gobierno y academia del país.

El seminario se estructuró en cinco temáticas: la primera, permitió conocer las bases históricas y antropológicas conocidas para el CVSS; la segunda, el contexto geocientífico incluyendo estudios geológicos, geomorfológicos, estructurales, hidrogeológicos, vulcanológicos, sismológicos y geofísicos; la tercera, involucró las amenazas geológicas; sismicidad, erupciones volcánicas y flujos de escombros; la cuarta monitoreo volcánico; y la quinta, uso del suelo en el CVSS, experiencias de geoconservación, geoturismo en Colombia y Centroamérica.

La agenda técnica de este seminario contó con investigadores de alto nivel, nacionales e internacionales, consolidando un total de treinta dos (32) intervenciones, utilizando uno de los formatos de presentación oral más eficientes en espacios técnicos virtuales, con una duración de 20 minutos de presentación y, 10 minutos de preguntas y respuestas.

Esta metodología de presentación permite al ponente y al público, tener una exposición dinámica y sistemática de las ideas más relevantes; centrando la presentación fundamentalmente en los métodos, conclusiones e implicaciones importantes de la investigación (Common Ground Research Networks, s.f.).

El objetivo principal del seminario de generar un espacio de intercambio y apropiación del conocimiento geocientífico en relación con el Complejo Volcánico de San Salvador se cumplió satisfactoriamente y se consolidó en la plataforma ideal para visibilizar diversas investigaciones realizadas por parte de investigadores independientes, entidades privadas, académicas y de gobierno de EL Salvador.

Un total de 30 ponentes aportaron sus investigaciones para el conocimiento del público general de más de 200 participantes dentro de los cuales estuvieron estudiantes de pregrado y maestrías en áreas relacionadas con las geociencias, delegados de protección civil, consultores privados, profesionales del sector público y privado, asociaciones, fundaciones y grupos de investigación de carácter nacional e internacional.

Por otro lado, el evento contó con el apoyo de la moderación por parte de doce (12) voluntarios de diferentes instituciones: estudiantes de licenciatura en geofísica de la Universidad de El Salvador sede Occidente, un profesional del Consejo Nacional de Energía (CNE), técnicos y especialistas del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

El Observatorio reconoce la importancia que tiene el conocimiento del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS) dada la cercanía a la que se encuentra el Área Metropolitana de San Salvador y la influencia directa que podrían tener las amenazas geológicas a la población siendo fundamental unir esfuerzos para el desarrollo de investigaciones conjuntas entre los principales actores tales como la academia, el sector privado y público, fondos de inversión y cooperación internacional.

Objetivos

Objetivo General

Compilar los estudios geocientíficos realizados en el Complejo Volcánico de San Salvador-CVSS.

Objetivos específicos

Visibilizar a las investigaciones geocientíficas realizadas en el Complejo Volcánico de San Salvador.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

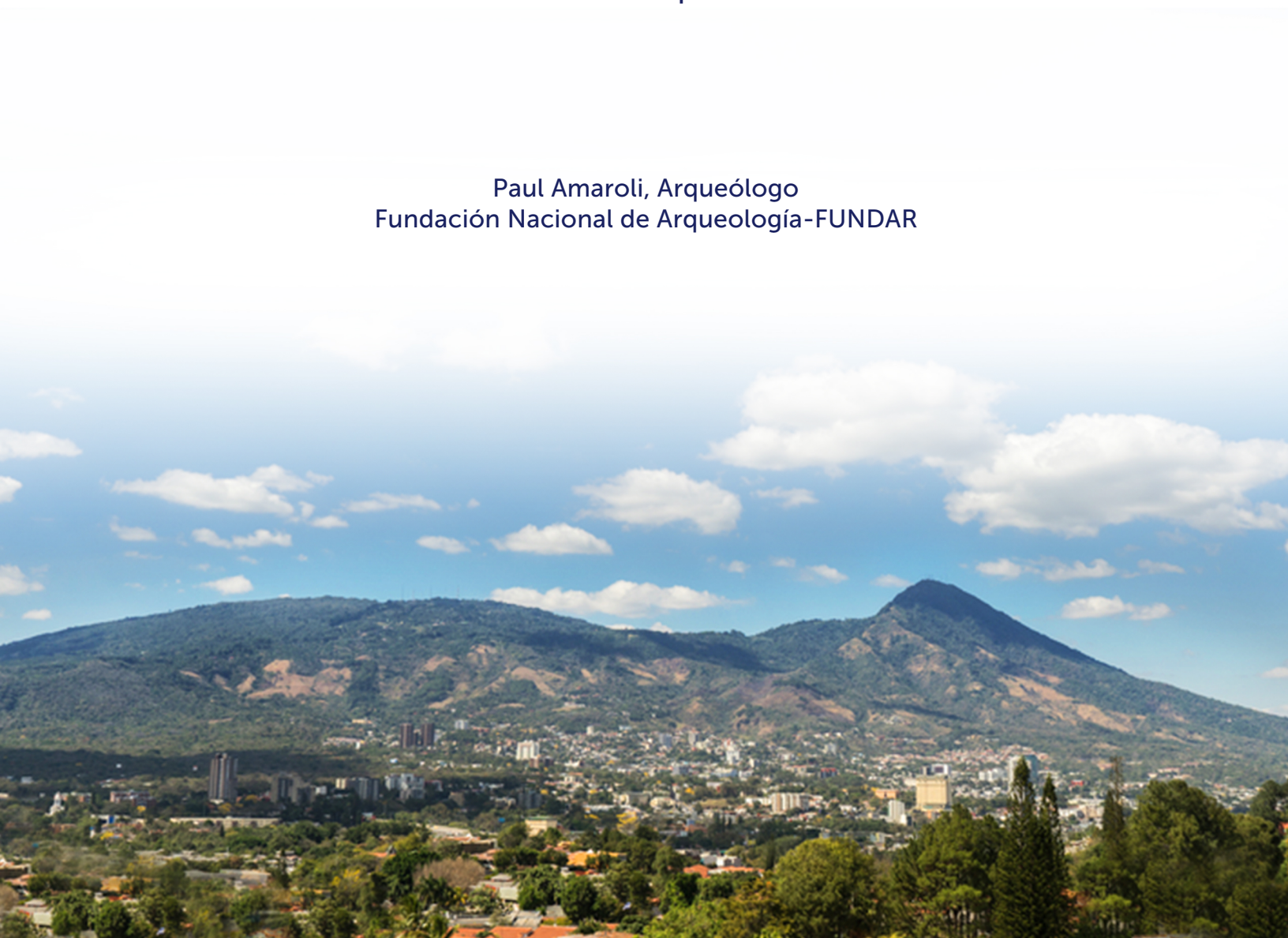
Capítulo I.

Antropología y arqueología

Ponencia 1

¿Cómo fueron afectados los Mayas y Pipiles en los alrededores del Complejo Volcánico de San Salvador por diferentes erupciones?

Paul Amaroli, Arqueólogo
Fundación Nacional de Arqueología-FUNDAR



¿Cómo fueron afectados los Mayas y Pipiles en los alrededores del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS) por diferentes erupciones?

Paul Amaroli, Arqueólogo

Resumen

La extensión de la civilización maya (2000 a.C. antes) en El Salvador se ha evidenciado en diferentes excavaciones realizadas para nuevas construcciones en las cuales se han encontrado formas circulares en el suelo relacionadas con perforaciones cónicas realizadas por los antepasados para almacenamiento de granos, algunas zonas de milpas y entierros humanos. En esta oportunidad Paul Amaroli comparte algunas de las afectaciones por erupciones volcánicas a la población Maya y Pipiles en los alrededores del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Una de las erupciones más reconocidas es la de Plan de la Laguna (800 a.C); también conocida como Cuzcatan es la erupción más antigua que se ha podido constatar con impactos a los humanos. La erupción se originó por un cráter central de Plan de Laguna en donde existió la Laguna Cuzcatan drenada artificialmente. En los años 90 diferentes excavaciones realizadas para construcción lograron exponer en superficie diferentes campos antiguos de milpas, dos localizados por el sector del Platillo de ciudad Merliot y un sitio arqueológico debajo de las calles de la parte antigua de Plan de Laguna donde se encontraron alrededor de una docena de entierros humanos a una profundidad de cuatro metros en posición boca abajo y cuerpos extendidos.

Este sitio fue cubierto por la tefra de plan de la laguna; en algunos afloramientos se identifican los surcos de los cultivos cubiertos por cenizas, algunas hojas antiguas de maíz con carbón que permitió fecharla como una de las milpas más antiguas que se conocen en Mesoamérica.

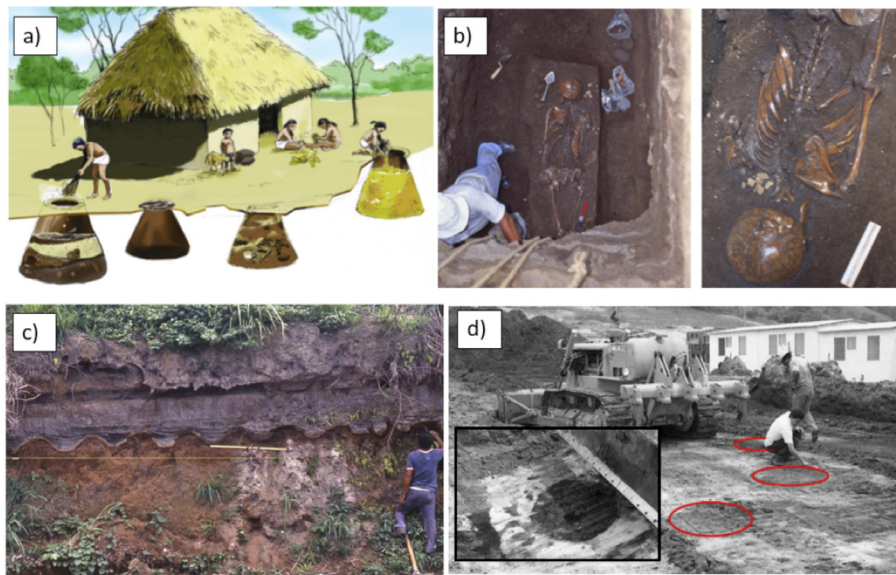


Figura 1. Hallazgos arqueológicos relacionados con la población Maya.

Nota: a) representación de agujeros para almacenamiento de granos realizados por los mayas, b) entierros humanos en posición boca abajo y cuerpo extendido c) afloramiento de depósito de tefras de Plan de La Laguna rellenando surcos de antiguos cultivos d) excavación al sur de San Salvador "La Cima", presencia de estructuras circulares en el suelo relacionadas con las perforaciones cónicas realizadas por los mayas para el almacenamiento de granos.

Por otro lado, las afectaciones de la erupción de TBJ (Tierra Blanca Joven) (540 a.C), en la población Maya fueron devastadoras con un estimado de muertes de más de 300 mil personas, esta cifra fue cuantificada de acuerdo con densidad poblacional por kilómetro cuadrado. El espesor de la capa de ceniza cerca de Ilopango excede los 50 metros, esta tefra cubrió en vida sitios como "La Cima" al sur de San Salvador, Joya de Cerén, una pequeña ciudad en Chalchuapa en donde se identificó un trapiche y varias casas. Adicionalmente, en Guazapa se encontró un bosque sepultado "Bosque de El Mico", que existió hace unos 1500 años.

Ahora bien, en relación con la erupción de Boquerón (800- 1000 d.C), depositó la tefra conocida como Toba de San Andrés, llamada así por la capital Maya de San Andrés, según las excavaciones esta zona fue ocupada por pobladores algunos años después por la presencia de una capa de piedra inmediatamente superior al depósito de tefras.

En la conocida época de colapso Maya en el territorio occidental de El Salvador entran los Pipiles provenientes de México al sureste de Mesoamérica entre 900-1000 d.C, en una de las migraciones prehistóricas mejor documentadas (Amaroli, 1992), los cuales fueron afectados por la erupción de El Playón 1658 que afectó todo el valle de Zapotitlán. Esta erupción según datos históricos empezó con siete bocas eruptivas después de unos días quedo activa una sola boca conocida como El Playón. La lava se extendió afectando a más de 17 pueblos pipiles y rodeando la antigua ciudad de Nejapa (Nixapán).

Referencias bibliográficas

Amaroli (1992). Algunos grupos cerámicos pipiles de El Salvador. Manuscrito archivado en la Secretaría de Cultura y FUNDAR, Sa Salvador 1992. <http://www.fundar.org.sv/referencias.html>

Capítulo I.

Antropología y arqueología

Ponencia 2

Aspectos antropológicos de los moradores del
volcán de San Salvador

Saúl Campos Morán.
Universidad Tecnológica de El Salvador.



Aspectos antropológicos de los moradores del volcán de San Salvador

Saúl Campos Morán.
Universidad Tecnológica de El Salvador.

Resumen

La concepción del volcán San Salvador como parte nuestro escenario cotidiano y cultural se ha investigado a partir de los aspectos antropológicos de sus moradores. Las características naturales del volcán como clima, fauna y flora lo convierten en un patrimonio natural para EL Salvador según Unesco (2003), siendo un símbolo cultural que se reconoce más por los beneficios que por la amenaza intrínseca que representa para la población. El área de influencia del volcán incluye los municipios de Colón, San Juan Opico, Quezaltepeque, San Salvador y Nejapa. Siendo los municipios de Quezaltepeque y Nejapa los que tiene una mayor identidad en tradiciones e historias relacionada con la erupción de 1917.

Esta identidad es uno de los aspectos claves para el entendimiento de la concepción del volcán como parte de la cotidianidad de los habitantes y como esta interacción volcán habitante está relacionada con las condiciones de vivienda, cultura local, relaciones sociales, actividades económicas que moldean el comportamiento y la actitud de los moderadores del volcán.

En la investigación “Etnografía del Volcán San Salvador” realizada por investigadores de la Universidad Tecnológica de EL Salvador se ha logrado rescatar parte de la tradición oral a partir de testimonios de los hijos de los sobrevivientes a la erupción de 1917 y que aún el volcán forma parte de su imaginario colectivo y de su memoria histórica.

En primer lugar, se identificaron algunos de los elementos económicos de los cantones cercanos al volcán, entre los cuales se incluye la manufactura vegetal, cultivo de café, ventas informales y remesas.

Los cambios en las actividades económicas han generado un desinterés por el desarrollo de los cultivos de café lo que se evidencia en la carencia de personas para la siembra y recolección. En cuanto al procedimiento de creación de carbón vegetal es una técnica antigua que consiste en apilar la madera en pequeños montículos, que posteriormente, son cubiertos por tierra y que al interior se incendian para la quema de la madera y generación del carbón vegetal.

Por otro lado, se tuvo la oportunidad de entrevistar a las personas que mantienen la tradición de las viejadas, fiestas y bailes que se realizan con el uso de máscaras de madera de pito de diferentes animales. Esta celebración solía hacerse en el mes de noviembre, generalmente, se hacían bailes en los cementerios.

De acuerdo con los testimonios de los habitantes se han logrado rescatar algunas leyendas entre las cuales están: la Leyenda del bolo guía, El chino quemado, La cruz del Corpus, Los monos tirapiedras, El Cipitío ensabanado, Los Chintos, La Viejada, Las bolas de fuego.

Es importante vincular la comunidad y tener conocimiento de cómo se reconoce el Volcán San Salvador en la población que convive con él, la memoria histórica que principalmente está relacionada con la erupción del 1917.

Referencias bibliográficas

Campos, S., Navarrete, P., Osegueda, C. (2017). Etnografía del volcán de San Salvador, Universidad Tecnológica de El Salvador (UTEC). (Colección Investigaciones N.º 67.

Unesco (2003). Convención para la salvaguardia del patrimonio cultural inmaterial. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la cultura. Disponible en http://portal.unesco.org/es/ev.php-URL_ID=17716&URL_DO=DO_TOPIC&URL_SECTION=201.html

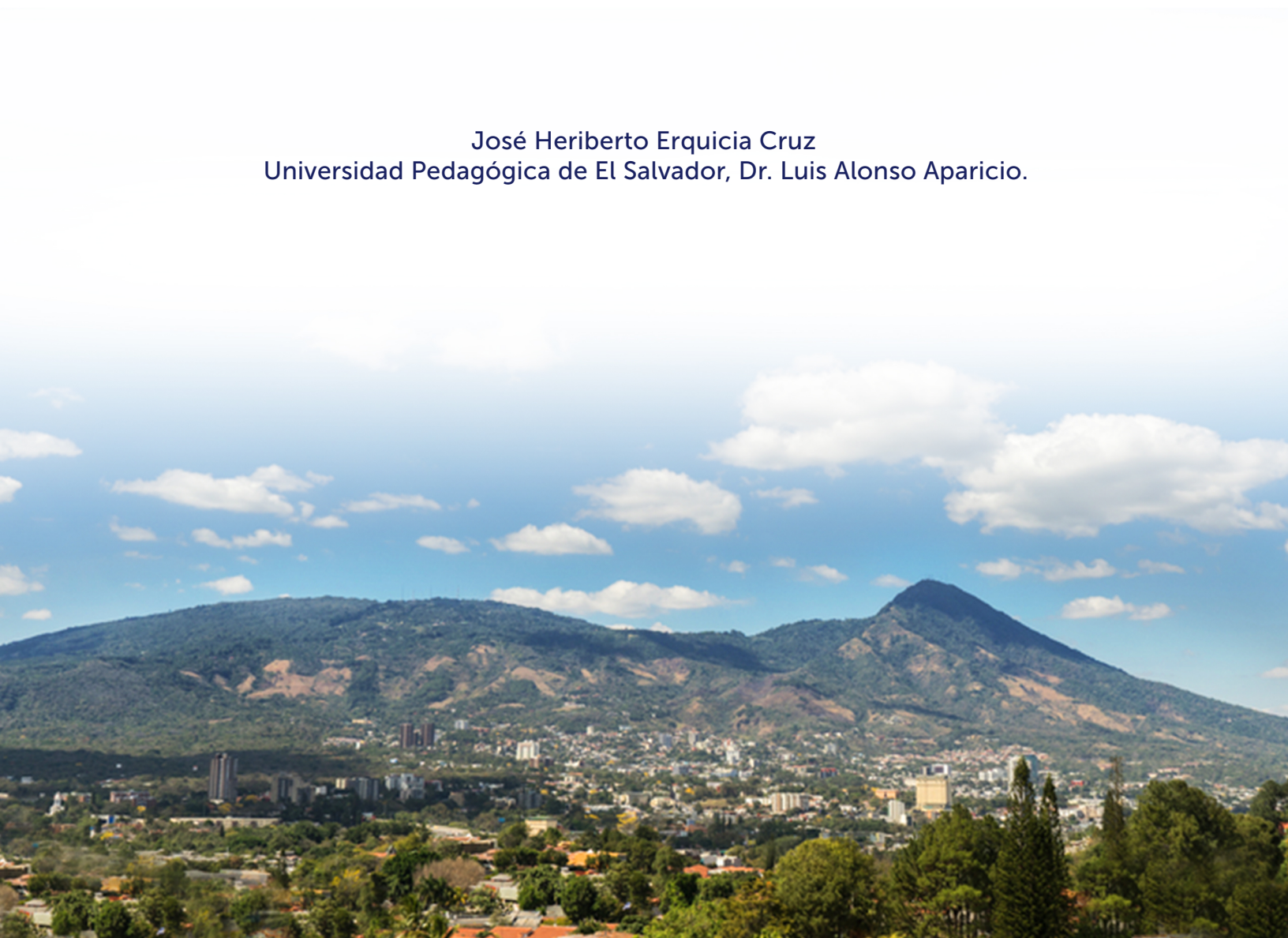
Capítulo I.

Antropología y arqueología

Ponencia 3

Aproximación a los vestigios arqueológicos cubiertos por la erupción del playón-San Salvador en el siglo XVII.

José Heriberto Erquicia Cruz
Universidad Pedagógica de El Salvador, Dr. Luis Alonso Aparicio.



Aproximación a los vestigios arqueológicos cubiertos por la erupción del playón-San Salvador en el siglo XVII.

José Heriberto Erquicia Cruz
Universidad Pedagógica de El Salvador, Dr. Luis Alonso Aparicio.

Resumen

Desde la arqueología histórica se puede construir el contexto de los acontecimientos durante las erupciones del Volcán de San Salvador. Esa construcción se hace a partir de relatos históricos, cultura material y restos arqueológicos; en esta oportunidad se presenta la narrativa de un documento escrito en 1722, "Historia Natural del Reino de Guatemala", escrito por Fray Francisco Ximénez; sesenta años después de la erupción conocida como del volcán El Playón. Los lugares que se hará mención se encuentran en el valle de Zapotitlán y se relacionan con las descripciones textuales realizadas por Ximénez (1722).

Una de las primeras descripciones que realiza Ximénez (1722) es la siguiente: "El volcán que llaman de S. Salvador, está junto a aquella ciudad, de modo que esta como a la misma falda. Aqueste antiguamente echó muchísimo fuego. Hasta que agora sesenta, o setenta años, reventó por un gran llano que esta entre aqueste volcán, y el pueblo de Opico, y todo aquel llano que será de más de dos leguas, estaba como una caldera que hervía, y en ella como si diera vuelta con su hervor se volteaban los árboles, y las piedras como una masa espesa, levantándose de ella como espuma, que se fue congelando y lleno todo aquel campo de aquesta materia, haciendo como torres, que de lejos parecía una gran ciudad" Fray Francisco Ximénez, 1722. Historia Natural del Reino de Guatemala, 1967, pp. 153-15.

Esta narración da una visión de cómo se vivió la erupción de 1659 describiendo lugares, dimensiones y el comportamiento de la naturaleza ante la fuerza de la erupción volcánica relacionando grandes montículos formados por la lava como una gran ciudad.

Por otro lado, otra de las descripciones realizadas por Ximénez (1722), hace referencia a otros sitios históricos que para el siglo XVII estaban funcionando citando lo siguiente:

“Parte de una hacienda que tiene nuestro convento de S. Salvador, y entro en esta cuenta la que se llama Atapasco. Y, por donde dio fin aquesta reventazón un peñasco de piedra viva [...] Con la reventazón ataxó un río caudaloso, que pasaba por aquel llano que se llama Nexapa [...] hizo una laguna muy grande junto al pueblo de Guaimoco...” Fray Francisco Ximénez, 1722. Historia Natural del Reino de Guatemala, 1967, p. 154.

Lo anterior permite identificar que sitios de haciendas fueron afectados por la erupción. Adicionalmente, se tiene conocimiento que el convento de la orden de los dominicos era uno de los más importantes en el conocido como San Salvador colonial, que tenían en su poder varias haciendas con ganado, producción de caña de azúcar y añiles.

Uno de los ejemplos relevantes es la hacienda conocida como “Atapasco”, que está al norte de Quezaltepeque y que hoy conserva el obraje de añil que fue cubierto por cenizas en la erupción de 1659. En este lugar también se guardan los restos de un ingenio de producción de hierro y la estructura hidráulica que se utilizaba para la fabricación de añil “oro azul” de la época colonial San Salvadoreña, ahora esta hacienda es conocida como “Río Claro”.

Es importante resaltar la cita que hace el documento de Ximénez (1722) en cuanto a la concepción de la erupción de los pobladores del antiguo pueblo de Nejapa, tal y como lo relata el autor en la siguiente descripción.

“...estando, celebrando la fiesta del Sto. [Gerónimo] que era el titular de un pueblo llamado también Nexapa, que tenía su asiento en aquella llanada[...] y, siendo así que la tierra reventó por todo el contorno de aquel pueblo[...] los indios dexaron aquel sitio y se pasaron donde hoy están camino de la ciudad, y se llevaron su Sto. [...] Está en penitencia, con su piedra, con su piedra en la mano, hincado de rodillas delante de un cruxifijo.” Fray Francisco Ximénez, 1722. Historia Natural del Reino de Guatemala, 1967, p. 154.

La anterior descripción, relata cómo esta erupción afectó al antiguo pueblo de Nejapa, antes llamado asentamiento de San Gerónimo de Nejapa el cual se trasladó

durante la erupción. La concepción de los habitantes según Ximénez (1722), en ese momento y que aún se conserva como creencia es que San Gerónimo fue quien ayudo a los Nejapanenses a que la lava rodeara el pueblo y no lo afectara hasta su interior.

Esta es una cosmovisión que se respeta desde la visión de las ciencias sociales y que es importante de conocer y, que se representaba con una estatua de San Gerónimo llevando una "piedra".

En cuanto a los acontecimientos previos y durante la erupción la descripción hecha por Ximénez (1722) es la siguiente:

En aquesta ocasión fue tan grande el terremoto de la tierra que toda la ciudad de S. Salvador vino al suelo, y al volcán se le hundi6 toda la punta, que seg6n afirman los antiguos, y lo que 6l demuestra, debió de ser m6s de media legua de altura." Fray Francisco Ximénez, 1722. Historia Natural del Reino de Guatemala, 1967, p. 155.

Lo anterior, nos permite resaltar la importancia de las investigaciones hist6ricas arqueol6gicas y antropol6gicas, para entender la relaci6n del ser humano y su relaci6n con su entorno geol6gico, volc6nico, con los valles y cordilleras y, como diferentes entes se representan como s6mbolos intrínsecos de determinada poblaci6n. Un ejemplo este s6mbolo del colectivo entre los pueblos y que construye El Salvador actual e hist6rico es el sello de platería que se marcaba en los productos elaborados en el San Salvador Colonial siendo un s6mbolo permanente en la poblaci6n.

Referencias bibliogr6ficas

Fray Francisco Ximénez, 1722. Historia Natural del Reino de Guatemala, 1967, pp. 153-15
Informe del alcalde mayor de San Salvador de 1740 Manuel Gálvez y corral.
Informe de la descripci6n geogr6fica y moral del obispo de Guatemala Pedro Cortez.
Informe del intendente Guti6rrez y Ulloa, 1807.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geología

Ponencia 4

Cartografía geológica actualizada del CVSS. Escala 1:50.000.

José Alexander Chávez

Unidad Innovación y Desarrollo Metropolitano de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador-OPAMSS.



Cartografía geológica actualizada del CVSS. Escala 1:50.000.

**José Alexander Chávez
Unidad Innovación y Desarrollo
Metropolitano-OPAMSS.**

Resumen

Los mapas geológicos en áreas volcánicas contribuyen al conocimiento histórico de eventos que sucedieron en el pasado y que pueden ocurrir en el presente tal como lo expresa uno de los principios básicos de la geología conocido como el actualismo.

Los estudios geológicos pueden aplicarse en una amplia gama de disciplinas por ejemplo en la exploración de materias primas, aguas subterráneas, ingeniería geológica, geotecnia, riesgos volcánicos, condiciones de sitio para construcción, movimientos en masa y amenaza sísmica (Vallejo et al., 2002).

Un mapa geológico es la representación sobre un mapa topográfico de diferentes tipos de rocas que afloran en superficie y estructuras tectónicas (pliegues y fallas). Los diferentes tipos de rocas pueden ser agrupados en unidades geológicas de acuerdo con sus características y edades, representadas por diferentes colores y achurados.

En el caso del mapa geológico del Área Metropolitana de San Salvador a escala 1:50.0000 se lograron clasificar alrededor de sesenta unidades geológicas.

La información base para la construcción de este mapa incluye el mapa geológico a escala 1:100.000 (Bosse et al., 1978), que fue refinado en algunos sectores durante la etapa de campo, información de zonas actualmente urbanizadas caracterizadas en el trabajo de Schmidt-Tomé (1975-1978), datos publicados por la Cooperación Alemana (Consorcio EL Salvador-Italia, 1988) después del terremoto de 1986, mapas geológicos a escala 1:50.000 hacia el norte del AMSS Hradecký et al., 2004 y el mapa geológico a escala 1:50.000 al sur del AMSS (Lexa et al, 2011).

Una cartografía más detallada se realizó en algunos sectores del Complejo Volcánico de San Salvador a escala 1:25000 y 1:10.000, en el área de Ilopango.

A partir de esta información, se procedió a realizar el trabajo de campo para la construcción del mapa geológico actualizado del AMSS a escala 1:50.000, realizado en dos temporadas durante los años 2008-2009 y 2018-2019, con un total de 2906 afloramientos descritos.

Estos datos fueron integrados con descripciones litológicas realizadas por Czech Geological Survey, 2005, Hernández (2019), Suñe et al., 2018 y, fuentes no publicadas. Por otro lado, también se incluyeron isópacas publicadas con anterioridad, de erupciones explosivas de Ilopango, San Salvador y Boquerón.

De forma general, el trabajo de cartografía geología del AMSS a escala 1:50.000 permitió reclasificar las unidades geológicas como sigue:

Formación Bálsamo: volcanes antiguos de Jayaque, Panchimalco, Ilopango, sectores Lateritas.

Formación Cuscatlán: Ignimbritas de Zaragoza, Tobas de Ilopango antiguo, Volcanismo subacuático de la caldera de Ilopango, Loma El Cerrito y EL Bonete maares, Volcán Loma Larga, Volcanes de Nejapa, Guaycume, Guazapa, El Carmen, Conos de escoria y flujos basáltico/andesítico del Norte, Domos de San Jacinto y cono efusivo, cono de escoria San José. Otros domos, Tobas Coatepeque.

Formación San Salvador/Cuscatlán: Volcán San Salvador antiguo (Picacho).

Formación San Salvador: Volcán Boquerón y sus productos, Maar Plan de Laguna y sus productos, Formación San Salvador, Volcán Boquerón y sus productos, Maar Plan de Laguna y sus productos, Maar La Tabla, Caldera de Ilopango y sus productos (tierras blancas).

Este estudio incluyó una reconstrucción en términos paleovolcánicos por medio de caracterización de facies de las áreas proximales (aglomerados, brechas piroclásticas, lavas), áreas intermedias (flujos de escombros), áreas distales (brechas epiclásticas, depósitos fluviales).

De acuerdo con esta investigación, el volcán de San Salvador se extiende sobre

formación antiguas intercaladas con depósitos piroclásticos de la erupción de Ilopango, descansando sobre los horizontes de tefras del Congo y Arce de la caldera de Coatepeque.

Diferentes cortes geológicos realizados en dirección NE y SE del CVSS permiten diferenciar los cambios en la depositación de las unidades volcánicas del Picacho. Por ejemplo, en una dirección NE se encuentran principalmente unas secuencias de escorias, tefras, flujos de lava, depósitos epiclásticos y en la parte más distal; conos de acumulación aluvial. Por otro lado, tomando un perfil en dirección SE se encuentran flujos de lava, productos volcánicos de la erupción talpetate, aglomerados, escorias y tobas siendo favorecida de piroclastos por la dirección del viento SE durante la actividad eruptiva.

El levantamiento de columnas estratigráficas en diferentes sectores permite agrupar los estratos geológicos en complejos de rocas y tefras definidas por su litología y petrografía.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, I., Chávez, J., Cuestas, I., Mejía, J., Landaverde, M., Campos, S. (2020). Estudio sobre infiltración y su relación con la geología del Área Metropolitana de San Salvador, El Salvador. *Revista Geológica de América Central*, 63, 1-17, 2020 doi: 10.15517/rgac.v63i0.43401 ISSN: 0256-7024.
- Bosse H., Lorenz W., Merino A., Mihm A., Rode, K, Schmidt T., Wiesemann G, Weber, H. (1978) Geologische Karte der Republik El Salvador, Mittelamerika. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 6 sheet.
- Chávez, A., Valenta, J., Schrofel, J., Hernández, W., Šebesta, J (2012). Mapeo de Ingeniería Geológica en la parte sur del área metropolitana de San Salvador. *Revista Geológica de América Central*, 46: 161-178, 2012. ISSN: 0256-7024.
- Chávez, J., Bichara, Y., Miranda, K., Funes, B., Alfaro, I., Vásquez, M., Calderón., C., Miranda, T., Alfaro, M., Minero, R., Šebesta, J., Lexa., Hroch, T., Lazecky M (2020). Promoting Resilience and Sustainability in the Metropolitan Area of San Salvador. <https://doi.org/10.31058/j.ud.2020.31002>.
- Hernández W, Jicha B (2019) Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador. Universidad Tecnológica de El Salvador, Colección Investigaciones 86, pp 1-58.
- Hradecký P, Baratoux L, Guevara M, Havlíček P, Hernández W, Kvaček Z, Mašek D, Novák Z, Nováková D, Opletal M, Pullinger C, Rapprich V, Šebesta J, Vorel T (2004)

- Geological research on natural hazards in central El Salvador in provinces of La Libertad, San Salvador and Cuscatlán. Unpublished Final Report, Czech Geological Survey, Prague, Servicio Nacional de Estudios Territoriales, San Salvador, pp 1–108 (in Czech and Spanish).
- Lexa, J., Šebesta, J., Chávez, A., Hernández, W., Pécskay, Z (2011). Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area. *Journal of Geosciences*, 56 (2011), 105-140. DOI: 10.3190/jgeosci.088.
- Lexa, J., Šebesta, J., Hernández, W., Chávez A. (2019) Elaboración de Mapa Geológico y su caracterización en escala 1:50.000. Proyecto financiado con fondos de la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo AACID y ejecutado por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador OPAMSS. <https://geoportal.opamss.org.sv/pdf/IngenieriaGeologica.pdf>.
- Suñe-Puchol I, Aguirre-Díaz Gj, Pedrazzi D, Dávila-Harris P, Miggins Dp, Costa A, Ortega-Obregón C, Lacan P, Gutiérrez E, Hernández W (2019) The Ilopango caldera complex, El Salvador: Stratigraphic revision of the complete eruptive sequence and recurrence of large explosive eruptions. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.02.011>.
- Suñe-Puchol I, Aguirre-Díaz Gj, Dávila-Harris P, Miggins Dp, Pedrazzi D, Costa A, Ortega-Obregón C, Lacan P, Hernández W, Gutiérrez E (2018) The Ilopango caldera complex, El Salvador: Origin and early ignimbrite-forming eruptions of a graben/pull-apart caldera structure. *Volgeo* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.12.004>.
- Schmidt-Thomé M (1975) The geology in the San Salvador area (El Salvador Central America) a basis for city development and planning. *Geol Jb, Reihe B: Regionale Geologie Ausland* 13: 207–228.
- Vallejo et al. (2002) *Ingeniería geológica*, Pearson Educación, ISBN 8420531049, 9788420531045.
- Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador OPAMSS, Geoportal del Sistema de Información Metropolitano, mapa geológico del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) Escala 1:50.000. <https://geoportal.opamss.org.sv/portal/index.php/view/map/?repository=07&project=AnexosReglamento>.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geología

Ponencia 5

Mapa geomorfológico CVSS. escala 1:50.000. sector El Carmen 1:10.000 y mapa ingeniería geológica. Escala 1:10.000

José Alexander Chávez

Unidad Innovación y Desarrollo Metropolitano de la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador-OPAMSS.



Mapa geomorfológico CVSS. Escala 1:50.000. Sector el Carmen 1:10.000 y mapa ingeniería geológica. Escala 1:10.000

José Alexander Chávez
Unidad Innovación y Desarrollo
Metropolitano-OPAMSS.

Resumen

El área metropolitana del AMSS está ubicada dentro la zona del Graben Central (depresión tectónica) de El Salvador, que se expande aproximadamente 4 milímetros/año de manera constante, generando movimientos de cizalla que inciden en la formación de laderas tectónicas, sismicidad y volcanismo.

Esta configuración permite diferenciar la zona de volcanes antiguos, extintos y recientes. Los volcanes antiguos son representados geomorfológicamente por laderas antiguas generalmente por el colapso y formación de calderas entre los cuales están paleovolcánes Panchimalco, Ilopango, Jayaque; hacia la parte central se encuentran los volcanes de San Salvador, San Jacinto y al norte volcanes extintos como Nejapa, Guaycume, Guazapa y Tecomatepeque. De esta manera, se distingue que el territorio de El Salvador se encuentra en un marco tectónico-volcánico con volcanes activos dentro del AMSS como el volcán San Salvador y la caldera de Ilopango.

Los estudios geomorfológicos permiten reconocer diversas formas de la superficie de la tierra, su origen y su desarrollo ante la acción de procesos como meteorización, denudación e intervención antrópica. El entendimiento de la interacción de estos procesos es fundamental para identificar sectores con mayor peligrosidad y mitigar los riesgos.

En el caso de estudio del mapa geomorfológico del AMSS, se utilizó como herramienta principal sensores remotos y la interpretación de fotografías aéreas de los años 1949, 1984 y 2002 analizadas mediante el uso de estereoscopio que permitieron reconocer las condiciones del terreno antes de las urbanizaciones recientes, además de visitas de campo.

A partir de un modelo de elevación digital de 10 metros de resolución y un modelo de sombras se interpretaron diferentes unidades tectónico-estructurales, centros volcánicos, zonas de movimientos en masa, erosión y acumulación algunas de las cuales fueron validadas mediante trabajo de campo.

En el caso del complejo volcánico de San Salvador, se diferencian los sectores de El Picacho, Boquerón, zonas de planicie aluvial y flujos de escombros antiguos.

En general, en el AMSS hay dos grupos básicos de morfoestructuras: laderas y formas estructurales de origen volcánico y laderas superficies y formas de origen tectónico. Información geomorfológica se ha representado en un mapa de peligrosidad que, integrado con investigaciones previas de amenaza por caída de ceniza, flujos piroclásticos permiten definir las zonas de mayor riesgo. Este mapa se representa en tres categorías alta, media y baja problemática siendo una herramienta útil para la zonificación del uso del suelo.

Por otro lado, se generaron mapas de ingeniería geológica lo cuales pueden ser representaciones en planta y en perfil de la integración de datos geológicos, hidrogeológicos, geomorfológicos, peligrosidad geológica, información geotécnica, sísmica y peligrosidad volcánica que permiten dar soluciones geotécnicas y aportar a la mitigación de riesgos e impactos ambientales. La anterior información es de interés para la planificación del uso del suelo, diseño, construcción y mantenimiento. Los mapas de ingeniería geológica peligrosidad deben ser fáciles de interpretar para los constructores y planificadores, agrupando unidades con características o propiedades similares y deberán incluir aspectos de riesgos geológicos (inundaciones, movimientos de ladera, erosión, tectónica, riesgos volcánicos, geomorfología (dinámica superficial), hidrogeología (situación del agua subterránea), propiedades geotécnicas de los materiales geológicos.

Conocer de manera preliminar estos aspectos mejoran las condiciones necesarias para la realización de cimentaciones, obras de mitigación, uso del suelo más adecuado, ayudando a la toma de decisiones responsables y evitar pérdidas económicas y humanas.

El detalle del mapeo de información de ingeniería geológica dependerá de la calidad y disponibilidad de información técnica del área de estudio, los recorridos seleccionados para el mapeo, calidad del mapa topográfico, cantidad de puntos de

control en el mapeo, número de afloramientos naturales o artificiales, perforaciones, educación y experiencia de los profesionales en geociencias, y herramientas para la integración e interpolación de la información recolectada. Algunos de los puntos clave para tener en cuenta durante la realización de un mapa de ingeniería geológica son los cambios litológicos, contactos geológicos abruptos como por ejemplo entre lavas y brechas que presentan cambios en la resistividad y competencia del material.

Referencias bibliográficas

- Chávez, A., Hernández, W., Šebesta, J., Kopecky, L. et al. Application of geomorphologic knowledge for erosion hazard mapping. *Nat Hazards* 71, 1323–1354 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0948-8>
- Chávez Hernández, J.A., Lazecký, M., Šebesta, J. et al. Relation between surface dynamics and remote sensor InSAR results over the Metropolitan Area of San Salvador. *Nat Hazards* 103, 3661–3682 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04150-1>
- Dinámica superficial para evaluar procesos geodinámicos dentro del AMSS. Presentación Gestión de Riesgos y Disminución de Vulnerabilidad Social en el AMSS. San Salvador, marzo 2020. <https://geoportal.opamss.org.sv/pdf/DinamicaSuperficialAplicacion.pdf>
- Hroch, T., Valenta, J., Chávez, A., Šebesta, J. (2019) Ingeniería Geológica y Geomorfología del AMSS a escala 1:50,000 y de un sector de al menos 10 km² a escala 1:10,000. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Civil, Proyecto financiado con fondos de la Agencia Andaluza de Cooperación Internacional para el Desarrollo AACID y ejecutado por la Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador OPAMSS.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geodinámica

Ponencia 6

Avances en el conocimiento sobre la geodinámica
de El Salvador.

José Antonio Álvarez Gómez

Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid



Avances en el conocimiento sobre la geodinámica de El Salvador.

José Antonio Álvarez Gómez

Facultad de Ciencias Geológicas - Universidad Complutense de Madrid

Resumen

El Salvador se encuentra dentro de un contexto geológico de placas tectónicas en subducción, particularmente situado en el margen occidental de la placa de Caribe. Esta placa litosférica está influenciada también por la interacción de las placas Suramericana y Norteamericana y, una serie de límites de desgarre con acortamiento y compresión, en el norte y sur.

El borde occidental de la placa Caribe está constituido por un bloque de litósfera continental conocido como el bloque de Chortís situado originalmente en la placa Norteamericana, al sur de la margen pacífica de México (Figura 1). En la actualidad la placa de Caribe se desplaza a una velocidad aproximada de 20 milímetros al año hacia el oriente y, se mueve de manera homogénea desde Nicaragua y Honduras hasta las Antillas. Sin embargo, en su extremo occidental la velocidad de desplazamiento disminuye llegando a los 11 milímetros al año en el sector de Guatemala (DeMets et al., 2007).

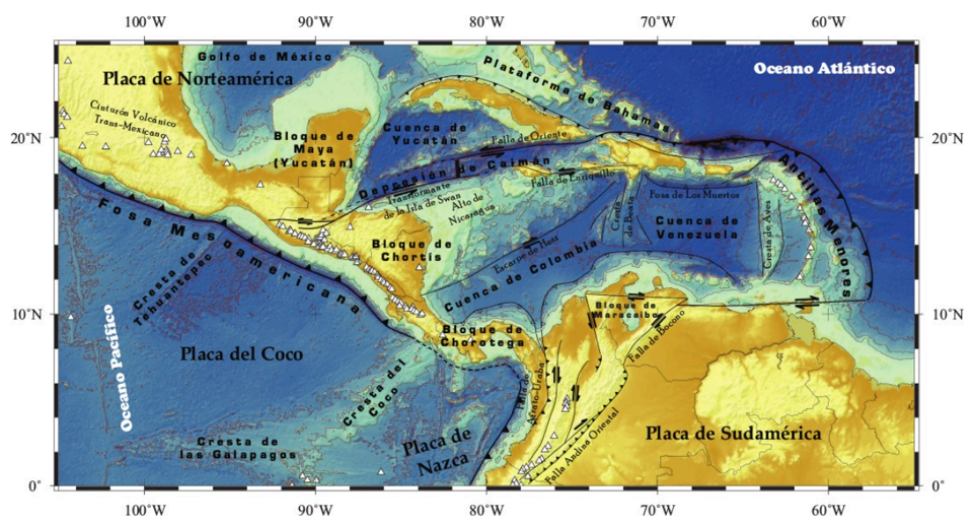


Figura 1. Mapa de la región del Mar Caribe (Álvarez -Gómez, 2009)

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

La deformación de la corteza de la placa Caribe se identifica en los vectores de velocidad de GPS (Ellis et al., 2018), existe una deformación interna que da lugar a la generación de zonas de grabens (depresiones tectónicas) de orientación aproximada N-S como se tiene en Honduras y Guatemala. La deformación en el bloque Chortís es lo que se define como un punto tripe difuso entre las placas Caribe- Norteamérica- Coco (Figura 2), (Guzmán Speziale et al. 1989), Álvarez Gómez, 2009).

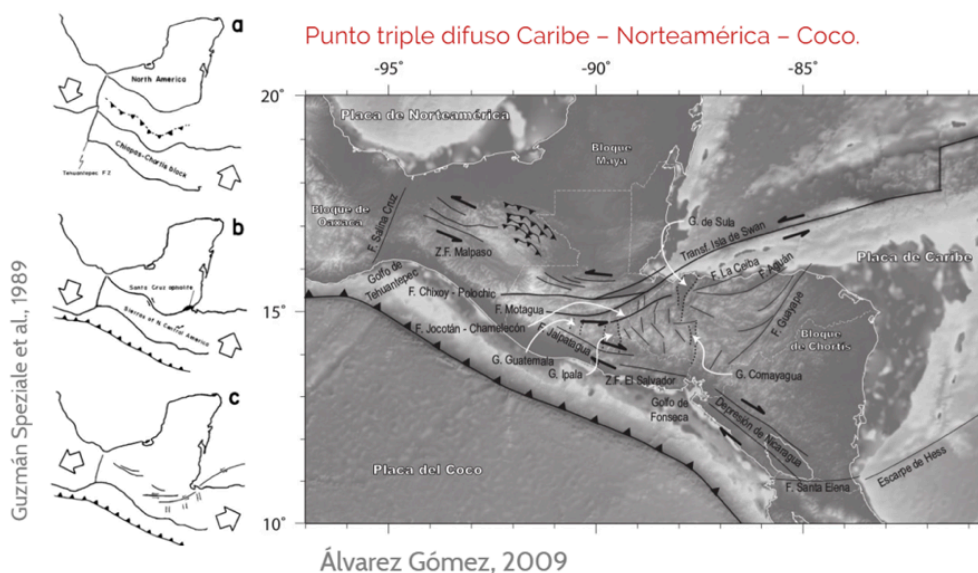


Figura 2. Mapa de distribución de los límites de placas entre Norteamérica y Sudamérica.

El contexto tectónico anterior es donde se desarrolla la deformación cortical en El Salvador cuya expresión son terremotos someros (representados por gráficas de pelotas de playa que indican el tipo de rotura del terremoto en la figura 3). Se muestra la distribución de los mecanismos someros; las pelotas de playa en color rojo representan terremotos generados por fallamiento normal en un ambiente de tipo extensional en dirección E-W y algunas en dirección N-S hacia Honduras y Guatemala.

En cuanto a los terremotos generados por desgarre se representan con color azul claro en dirección de la falla Montagua- Polochic, desgarres en dirección NW-SE, en el arco volcánico y sistemas de fallas de desgarre que separan el antearco de la placa Caribe y, finalmente, los terremotos generados por fallas inversas se representan en pelotas de playa color amarillo asociadas a zonas de cabalgamiento y pliegues desde la zona de Chiapas, margen caribe de Costa Rica y zona de subducción mesoamericana.

La sismicidad somera
refleja los procesos de
deformación corticales.

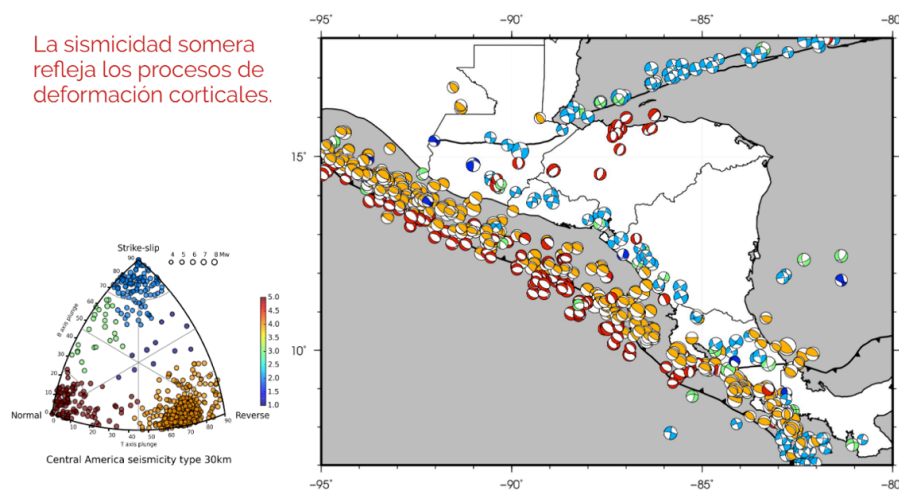


Figura 3. Distribución de sismicidad en Centroamérica de tipo normal, inverso y transcurrente a 30 kilómetros de profundidad.

Teniendo en cuenta el contexto tectónico de una zona de subducción es importante conocer el comportamiento, en regiones como Chile y Japón en donde la placa superior cabalga hacia la zona de subducción y, se superpone sobre la placa que está subduciendo se genera una zona de compresión hacia la parte delantera del trasarco ocasionando un acoplamiento en la zona de interfase que da lugar a grandes terremotos. Por el contrario, cuando se tiene la placa obducente en extensión no se generan terremotos de gran magnitud, esto es importante si revisamos los vectores de GPS en la zona de Norteamérica donde la placa se mueve en dirección a la costa generando un mayor acoplamiento en la zona de

subducción en México y Guatemala, este acortamiento da lugar a cordilleras por cabalgamiento y plegamiento, mientras en el caso de los vectores de GPS, en la región de Costa Rica, estos se disponen de manera ortogonal a la fosa debido al empuje general de la cresta de la placa de Coco con el antearco y la placa Caribe.

En el caso de la región comprendida entre Chiapas y Costa Rica los vectores de GPS están en dirección oeste-noroeste paralelos al desplazamiento del bloque de antearco y solamente de forma ortogonal en las zonas de mayor elevación en Guatemala, sector fallas Montagua- Polochic y, Talamanca en Costa Rica, en donde el acoplamiento es mayor por el empuje de la capa que subduce sobre la capa obducente. Las zonas de menor acoplamiento están relacionadas con fallamiento de tipo normal, por ejemplo, en la región del Golfo de Fonseca.

Las anteriores observaciones han llevado a la propuesta de diversas hipótesis respecto al mecanismo de deformación del arco volcánico en Centroamérica y como es su movimiento hacia el oeste-noroeste con respecto a la placa Caribe. La primera hipótesis hace referencia a una tracción donde se genera el desplazamiento de la placa norteamericana hacia el oeste atrapando el bloque de antearco y, desplazado hacia el oeste con un movimiento de toda la placa norteamericana. Esta tracción podría explicar el desplazamiento de antearco que se ha observado en los vectores de GPS y explicaría la extensión de los grabens de Honduras. La segunda hipótesis se relaciona con la subducción de la cresta de la placa de Coco en el sector de Costa Rica, la cual genera un empuje en el bloque de antearco que llega a desplazar ortogonalmente y hacia el oeste noroeste, en una especie de escape tectónico; explicando la deformación en la zona sur de Nicaragua y la atenuación de la deformación hacia El Salvador.

Complementariamente, existe otra propuesta para explicar la deformación por (DeMets, 2001), que hace una analogía con los mecanismos de subducción en

otras partes del mundo proponiendo un sistema de partición de la deformación. Esta hipótesis explica cuando se tiene una lámina de subducción de manera oblicua a la fosa, es decir no es totalmente ortogonal presentando cierto ángulo, en este caso el vector de desplazamiento se divide en dos: un vector ortogonal queda lugar a los terremotos de fallamiento inverso en la zona de subducción y un vector paralelo a la fosa que desplaza el bloque de antearco mediante un sistema de fallas de desgarre. En El Salvador se tiene ese sistema de fallas de desgarre y ese desplazamiento hacia el Noroeste, sin embargo, no se tiene la oblicuidad y acoplamiento suficiente en la zona de subducción. En otras palabras, la zona de subducción no está lo suficientemente en contacto con un acoplamiento efectivo mecánico que permita empujar el bloque de antearco, por lo que es poco probable que este mecanismo genera la deformación en El Salvador.

Con lo anterior, es posible que se tenga una combinación de dos motores de deformación, por un lado, una deformación generada por el movimiento de placa de Norteamérica, que captura al bloque de antearco, en su parte más noroccidental y lo arrastra, esto hace que la velocidad vaya aumentando hacia Chiapas- Guatemala. Pero, por otra parte, se genera un empuje de la cresta de la placa de Cocos bajo Costa Rica, que genera un empuje explicando la deformación en esta área.

Un ejemplo para explicar la deformación en El Salvador es el mecanismo de un tren con locomotora en parte delantera y trasera en donde se genera una tracción en ambos extremos (Figura 4). Esto se traduce en un sistema de desgarre en dirección aproximada este-oeste, con un bloque que se mueve más o menos de 12-13 milímetros al año hacia el occidente. Esta deformación al final se reparte en diferentes segmentos de sistemas de fallas como el área de Guaycume (8 milímetros/ año), segmento de San Vicente (=7-12 mm/año), Segmento de El Lempa (= 8 mm/año), Segmento de El Triunfo/Berlín, Segmento de San Miguel (2 mm/año) (Staller et al, 2016).

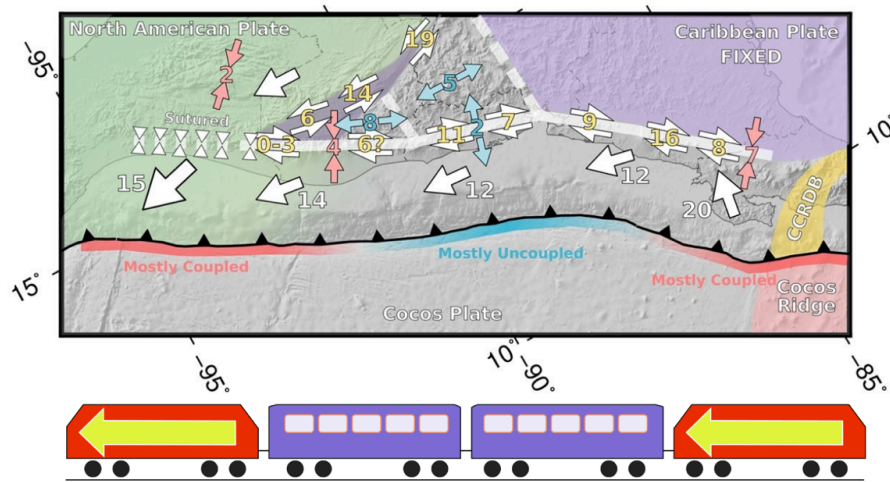


Figura 4. Esquema mecanismo de deformación en El Salvador.

Referencias bibliográficas

- Álvarez Gómez, José Antonio (2009) Tectónica Activa Geodinámica en el Norte de Centroamérica. <https://eprints.ucm.es/id/eprint/30783/>
- DeMets, C. (2001), A new estimate for presentday Cocos-Caribbean plate motion: Implications for slip along the Central American volcanic arc. *Geophysical Research Letters*, 28(21), 4043-4044.
- DeMets, C., G. Mattioli, P. Jansma, R. D. Rogers, C. Tenorio, y H. L. Turner (2007), Present motion and deformation of the Caribbean plate: Constraints from new GPS geodetic measurements from Honduras and Nicaragua, en *Geologic and Tectonic Development of the Caribbean Plate in Northern Central America: GSA Special Paper*, vol. 428, editado per P. Mann, pp. 21-36, Geological Society of America, Boulder, CO.
- Ellis, A., Demets, C., Briole, P., Cosenza, B., Flores, O., et al. GPS constraints on deformation in northern Central America from 1999 to 2017, Part 1 – Time-dependent modelling of large regional earthquakes and their post-seismic effects. *Geophysical Journal International*, Oxford University Press (OUP), 2018, 214 (3), pp.2177-2194. [ff10.1093/gji/ggy249](https://doi.org/10.1093/gji/ggy249)[ff. fhal-01992558f](https://doi.org/10.1093/gji/ggy249)
- Guzmán-Speziale, M., W. D. Pennington, y T. Matumoto (1989), The triple junction of the North America, Cocos, and Caribbean plates: seismicity and tectonics. *Tectonics*, 8(5), 981-997.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geología Estructural

Ponencia 7

Contexto estructural del complejo volcánico de San Salvador.

José Antonio Álvarez Gómez

Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid



Contexto estructural del Complejo Volcánico de San Salvador.

José Antonio Álvarez Gómez

Facultad de Ciencias Geológicas - Universidad Complutense de Madrid

Resumen

El sistema de fallas de El Salvador es parte del sistema de desgarre que separa el bloque de antearco del bloque de Chortís y la placa Caribe y, que se mueve a una velocidad que varía en los 6-12 milímetros al año; esta deformación da lugar a la zona de fallas (ESFZ). Teniendo en cuenta el mapa geológico de Bosse et al., 1976 en Martínez Díaz et al., 2021 las orientaciones de las fallas (estructuras que se han generado en los procesos de deformación de los últimos millones de años), se presentan en tres familias principales; una familia de orientación NW-SE muy común en todo El Salvador presente en los sectores de cordillera de El Bálsamo, Rio Lempa, cordillera Jucuarán-Intipucá, una segunda familia en dirección E-W paralelas a la zona de subducción que da lugar al sistema de fallas de desgarre de El Salvador y, finalmente, un sistemas de fallas de orientación NE-SW.

La configuración tectónica actual de El Salvador se puede explicar en cuatro estadios (Figura 1): A. Transpresión en el Mioceno, B. Delaminación de la losa y disminución de velocidad, C. Roll-back migración arco y generación de grábenes ($\approx 3-1.5$ Ma), D. Reactivación de estructuras de desgarre y transtensión (actualidad). Según Alonso Hernar et al., 2017 hace unos 5 millones de años aproximadamente la tasa de generación de la corteza oceánica de la dorsal del Pacífico eran el doble o más del doble de lo que es ahora. Estas tasas de generación de corteza generaban un empuje mayor cuando llegaban a la zona de subducción originando una tectónica compresiva en la placa superior. Particularmente en El Salvador, se presenta una zona transpresiva con compresión y una zona de desgarre.

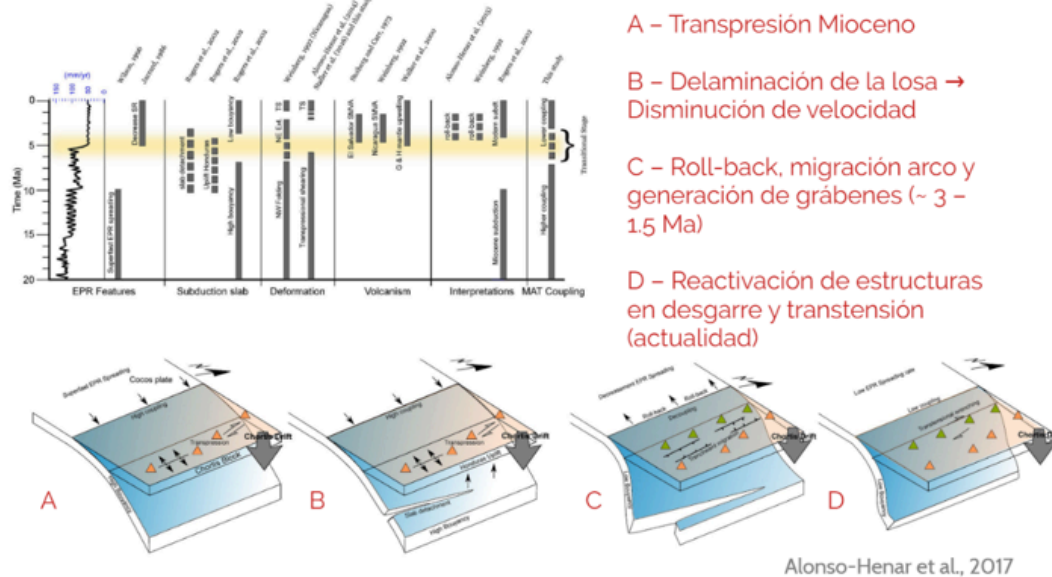


Figura 1. Evolución de la tectónica de la zona de subducción en el sector de El Salvador.

Posteriormente, hace aproximadamente 5 a 3 millones de años se produce una rotura de la losa de subducción produciendo que la velocidad de movimiento de placa disminuyera. Cuando ocurre esto, teniendo en cuenta otras zonas de subducción en el mundo se ralentiza la producción de corteza oceánica generando un proceso de *Roll Back*, en donde la placa en subducción se empieza a curvar y retrocede hacia la dirección de la dorsal oceánica generando una zona de tectónica extensional en la placa superior. Esta extensión se estima que tuvo lugar hace aproximadamente dos millones de años generando depresiones tectónicas (grábenes), que actualmente configuran la morfología de El Salvador.

Por otro lado, Canora et al., 2012 hace una cartografía de los segmentos principales de las zonas de falla en El Salvador con tres zonas principales. Para generar la orientación actual de las estructuras es necesario pasar por un estadio inicial de extensión que da lugar a fallas en dirección este - oeste representados por grandes escarpes y el graben central de El Salvador, posteriormente, estas estructuras son reactivadas en desgarre o transtensión en época reciente en dirección NE-SW generando los desgarres comunes en dirección N110 Y N120 que, finalmente, origina gran parte de las fallas extensionales en dirección NW-SE.

Utilizando modelado análogo Alonso Henar (2015), realizó decenas de experimentos y solo un par de ellos generan las estructuras y el comportamiento que se puede relacionar con la configuración estructural actual de EL Salvador. En estos modelos se estableció como base común una fase extensional inicial y una fase ortogonal a la zona de subducción, es decir, lo que estaría asociado al *roll back*, seguido de la fase de desgarre con transtensión. Estos modelos fueron ajustados a una zona de debilidad discontinua que se representa mejor con la configuración actual de cámaras magmáticas independientes y no como una zona de debilidad continua, como se ilustra en la Figura 2.

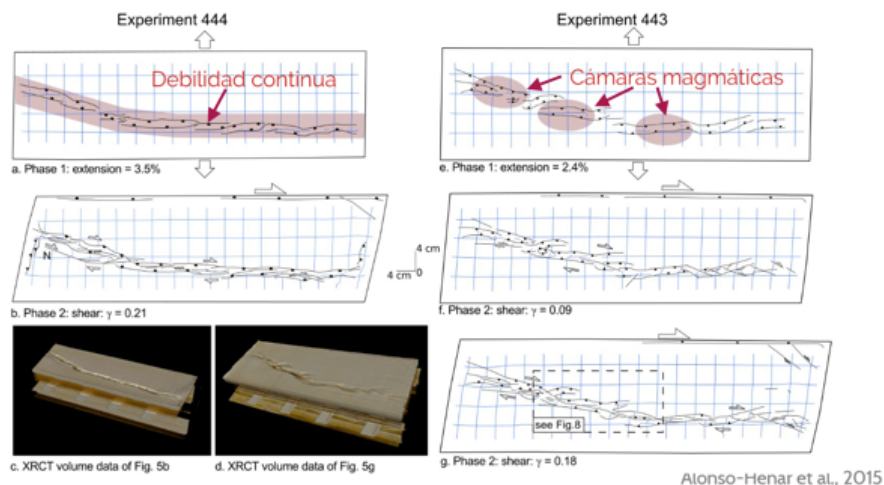


Figura 2. Modelos experimentales para simular la configuración tectónica de El Salvador, Alonso-Henar et al, (2015).

Este modelo sirvió de base al modelo tectónico propuesto por Suñe Puchol et al., 2019, para la explicación de la evolución del volcán de Ilopango. En general, el sistema de fallas de El Salvador es un sistema de desgarre dextral, es decir, que el bloque de Chortís se mueve hacia la derecha y el bloque de antearco se mueve hacia la izquierda, generando una serie de segmentos de fallas discontinuas, configurándose como relevos dentro de un ambiente de dilatación, en el cual se generan unas fracturas extensionales, cuencas pull apart, rotación de bloques y zonas extensionales aisladas.

Teniendo en cuenta la red de GPS publicada por Staller et al., 2018 se identifica que los segmentos de falla se encuentran en zonas de dilatación que facilitan el ascenso del magma y la generación de vulcanismo. En más detalle, Martínez-Díaz, 2021 clasifica distintas zonas en función de la importancia de la tectónica extensional en la zona central de EL Salvador. Ahora bien, la zona del Complejo Volcánico de San Salvador está relacionada con la zona de extensión originada por uno de los relevos del sistema de fallas de desgarre, para el cual se han propuesto diversos modelos. Agostini et al., 2006 infirió una falla en dirección de NW desde Ilopango, relevada por una falla al norte de Coatepeque, Santa Ana, y Ahuachapán generando una especie de bloque extensional que daría lugar al vulcanismo de Santa Ana y San Salvador.

Por otro lado, la cartografía de detalle realizada por Garibaldi et al., 2016 relaciona la zona de desgarre que va de desde San Vicente y atraviesa San Salvador, relevado por una falla en desgarre al sur de Coatepeque y Santa Ana, originando un sistema de fallas en dirección NNE-SS. De esta manera, los modelos que se han propuesto, principalmente están relacionados con un sistema de extensión que generó las fallas en dirección NNE-SSO habituales a lo largo del arco volcánico de EL Salvador. Complementariamente, Legran et al., 2020 ha propuesto un modelo de rotación en bloques de fallas sinistralas en dirección NE-SW, para explicar la actividad sísmica cerca del volcán San Salvador.

Por otro lado, la cartografía de Lexa et al., 2011 identifica fallas paralelas en dirección N110 N120, que son fallas de desgarre que retrabajan las antiguas fallas normales

de los grábenes. Atendiendo al modelo clásico de Durney y Ramsay, 1973 las fallas de desgarre destrales, en donde el bloque de arriba se desplaza hacia la derecha y el bloque inferior hacia la izquierda, generan zonas extensionales en dirección NW-SE, siendo esta la misma dirección de las estructuras asociadas al volcán San Salvador. El vulcanismo del CVSS está directamente relacionado con las estructuras NW-SE como se observa en la cartografía del sistema volcánico, en donde es común que las fallas se encuentren curvadas en la zona de cizalla.

Referencias bibliográficas

- Agostini S, Corti G, Doglioni C, Carminati E, Innocenti F, Tonarini S, Manetti P, DiVincenzo G, Montanari D (2006) Tectonic and magmatic evolution of the active volcanic front in El Salvador: insight into the Berlín and Ahuachapán geothermal areas. *Geothermics* 35: 368-408 <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2006.05.003>. Alonso-Henar, J., Schreurs, G., Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., Villamor, P. Neotectonic development of the El Salvador Fault Zone and implications for deformation in the Central America Volcanic Arc. Insights from 4D analogue modeling experiments. *Tectonics* 34, 133–151, 2015; doi: 10.1002/2014TC003723
- Bosse, H., W. Lorenz, A. Merino, A. Mihm, K. Rode, M. Schmidt-Thomé, H. S. Weber, y G. Wieseman (1978), Mapa Geológico de El Salvador / America Central, en Centro de estudios e investigaciones geotécnicas para El Salvador (GIG), Misión Geológica Alemana en El Salvador, editado por H. S. Weber y G. Wieseman, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Canora, C., Villamor, P., Martínez-Díaz, J.J., Berryman, K.R., Álvarez-Gómez, J.A., Capote, R., Hernández, W. Paleoseismic analysis of the San Vicente segment of the El Salvador Fault Zone, El Salvador, Central America. *Geologica Acta* 10, 103–123, 2012; doi: 10.1344/105.000001700
- Durney DW, Ramsay JG (1973). Incremental strains measured by syntectonic crystal grown. In: de Jong KA, Scholten R, Gravity and crystallization deformation. London. Ser A 283:229-40.
- Garibaldi, N., Tikoff, B. & Hernandez, W., 2016. Neotectonic deformation within an extensional stepover in El Salvador magmatic arc, Central

- America: implication for the interaction of arc magmatism and deformation, *Tectonophys*, 693, 327–339.
- Jaroslav Lexa, Jiří Šebesta, José Alexander Chavez, Walter Hernández, Zoltán Pécskay Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area, *Journal of Geosciences*, volume 56 (2011), issue 1, 106 – 140 DOI: <http://dx.doi.org/10.3190/jgeosci.088>
- José J. Martínez-Díaz, José A. Álvarez-Gómez, Alejandra Staller, Jorge Alonso-Henar, Carolina Canora, Juan M. Insúa-Arévalo, Meaza Tsige, Pilar Villamor, Paula Herrero-Barbero, Catalina Hernández-Moreno, Walter Hernández, Douglas Hernández, Griselda Marroquín, Luis Mixco, Active faults of El Salvador, *Journal of South American Earth Sciences*, Volume 105, 2021, 103038, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103038>
- Sunye Puchol, Ivan & Aguirre-Díaz, Gerardo & Pedrazzi, Dario & Davila-Harris, Pablo & Miggins, Daniel & Costa, Antonio & Ortega-Obregon, Carlos & Lacan, Pierre & Gutiérrez, Rubén Eduardo & Hernández, Walter. (2019). The Ilopango caldera complex, El Salvador: Stratigraphic revision of the complete eruptive sequence and recurrence of large explosive eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 374. 10.1016/j.jvolgeores.2019.02.011.
- Staller, A., Álvarez-Gómez, J. A., Luna, M. P., Béjar-Pizarro, M., Gaspar-Escribano, J. M., & Martínez-Cuevas, S. Crustal motion and deformation in Ecuador from cGNSS time series. *Journal of South American Earth Sciences*, 86, 94-109, 2018.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Hidrogeología

Ponencia 8

Beneficios hídricos del volcán de San Salvador, un regalo de la naturaleza para el AMSS.

Marcia de Calderón

Coordinadora de la Maestría en Ciencias en Gestión Integral del Agua,
Facultad de Ciencias Agronómicas Universidad de El Salvador.



Beneficios hídricos del volcán de San Salvador, un regalo de la naturaleza para el AMSS.

Marcia de Calderón

Resumen

El Salvador es uno de los países con mayor densidad poblacional en la región Centroamericana, posee aproximadamente 316 habitantes por km² en una extensión territorial de 21 km² con aproximadamente 6.6 millones de habitantes. Un 30 % de esta población se encuentra en el departamento de San Salvador específicamente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), localizada en el costado oriental del Volcán San Salvador.

Ahora bien, es importante realizar un contexto geográfico y climático de la ubicación estratégica de El Salvador que permite tener una potencialidad en la recarga de cuerpos subterráneos teniendo en cuenta los acumulados de precipitaciones anuales que recibe el territorio nacional.

Un valor de 1795 mm/año es la precipitación media desde 1965 hasta 2012, permitiendo categorizar a El Salvador dentro de uno de los países con mayor precipitación anual del planeta, los cuales se encuentran en un rango de 1000 a 3000 litros por m².

Sin embargo, esta potencialidad no es consistente con el acceso y disponibilidad del recurso en el país: según el Programa Mundial de Evaluación de Recursos Hídricos es una de las regiones con escasas económicas de agua, entendiéndola como el "impacto agregado de todos los usuarios, bajo determinado orden institucional que afecta al suministro o calidad del agua, de forma que la demanda de todos los sectores, incluido el medio ambiental no puede ser completamente satisfecha".

Por otro lado, algunos de los países con precipitaciones menores anualmente a las que se registran en El Salvador tienen un mejor acceso al recurso hídrico para su población satisfaciendo las demanda y necesidades de la población.

De lo anterior, radica la importancia de tener un conocimiento de las características geológicas que son claves para el entendimiento del flujo del agua subterránea en este caso del Área Metropolitana de San Salvador. Esta área se encuentra asentada sobre el acuífero de San Salvador, que forma parte de veintiún masas de agua subterránea de El Salvador y se conoce específicamente como ESA-06.

La investigación realizada titulada "controles geológicos en el flujo de agua subterránea y distribución de volúmenes de extracción asociados a una estructura volcánica compleja" realizada por Barrera de Calderón et al., 2021 caracteriza la distribución de la litología desde el punto de vista de su capacidad como reservorio de aguas subterráneas y el control estructural en el área integrando un Modelo Hidroestratigráfico Tridimensional (THM, por su sigla en inglés) como herramienta de evaluación del comportamiento del agua subterránea en el acuífero de San Salvador.

El contexto geológico y tectónico del área de San Salvador dentro de un ambiente volcánico activo con diversos sistemas de fallas y fracturas; ha generado potentes unidades volcánicas que contienen al acuífero de San Salvador.

El abastecimiento del recurso hídrico para la población del AMSS se encuentra circulando por debajo de la ciudad, aproximadamente un 41,7 % del recurso hídrico se abasteció de este acuífero entre los años 2012 -2015.

Por otro lado, desde 1975 a 2012 se ha generado una expansión urbana del AMSS que se relaciona con el incremento significativo de la demanda de agua para esta cantidad de habitantes.

Estos cambios en el uso del suelo generan condiciones menos favorables a la recarga adicionadas a las afectaciones por cambio climático. Además, este desarrollo está acompañado de impermeabilización de algunas zonas del AMSS que tienen condiciones favorables para la recarga hídrica.

La secuencia sedimentaria descrita por Barrera de Calderón (2021), para la cuenca

del AMSS incluye piroclastos y epiclastos de la Formación San Salvador hasta profundidades de 50 metros, lavas basáltico y andesíticas de la formación San Salvador y Cuscatlán hasta 75 metros, piroclastos y epilcastos de la formación Cuscatlán con un espesor de 8 metros y rocas de la formación Bálsamo, lavas basálticas y andesítica (30 m) y aglomerados con intercalaciones de lava basáltica.

De forma general los materiales litológicos del AMSS están conformados por materiales granulares, lavas compactas, y fracturadas.

En resumen, el acuífero de San Salvador representa una de las fuentes de agua más importantes para el abastecimiento del AMSS, sin embargo, es insuficiente para satisfacer la demanda de agua que se genera en su interior, requiriendo fuentes complementarias de agua importada

Referencias bibliográficas

- Barrera-de-Calderón, M., Garfias, J., Martel, R., Salas-García, J., 2021, Controles geológicos en el flujo de agua subterránea y distribución de volúmenes de extracción asociados a una estructura volcánica compleja: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 73 (1), A170820. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a170820ANDA>. (2010).
- Boletín Estadístico 2009 (Boletín N° 31; p. 151). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- ANDA. (2011). Boletín Estadístico 2010 (Boletín N° 32; p. 141). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- ANDA. (2012). Boletín Estadístico 2011 (Boletín N° 33; p. 150). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- ANDA. (2013). Boletín Estadístico 2012 (Boletín N° 34; p. 155). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Hidrogeología

Ponencia 9

Beneficios hídricos del volcán de San Salvador, un regalo de la naturaleza para el AMSS.

Laura Gil

Especialista en Hidrología Subterránea. Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales-MARN



Beneficios hídricos del volcán de San Salvador, un regalo de la naturaleza para el AMSS.

Laura Gil

Resumen

La zona de recarga acuífera en el Complejo Volcánico de San Salvador favorece la presencia de recursos hídricos subterráneos con un alto valor ambiental y mantenimiento de diversas actividades socioeconómicas. Según (PNGIRH 2017) se establece que la unidad básica de trabajo en hidrogeología subterránea son los acuíferos; definidos como una o más formaciones geológicas capaces de contener un volumen apreciable de agua y transmitirlo con cierta facilidad. Estos acuíferos y masas de agua han sido cartografiados a escala 1:100.000, delimitando las subcuencas del río Acelhuate y el río Sucio (Figura 1).

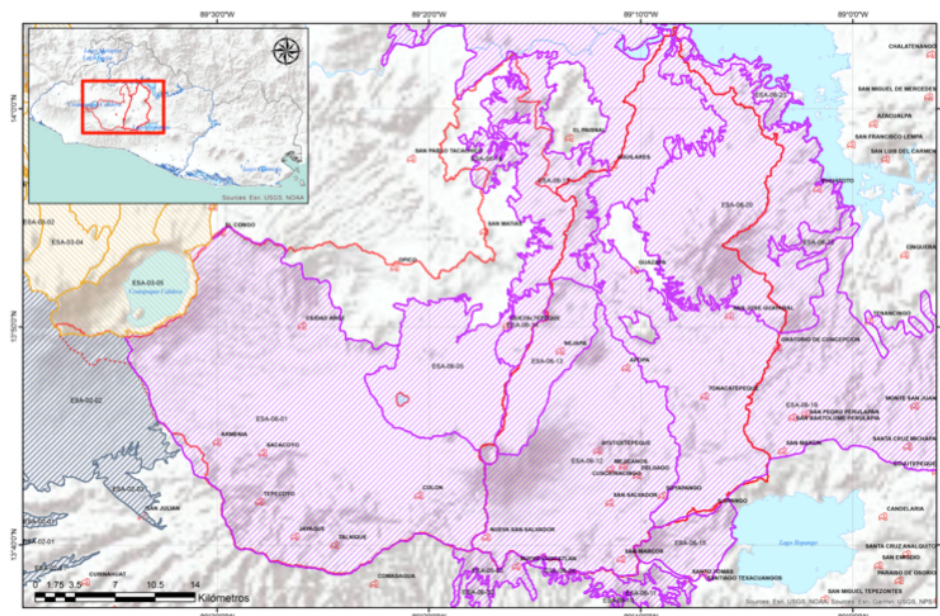


Figura 1. Mapa de las cuencas hidrográficas del río Acelhuate y el río Sucio. Fuente: (PNGIRH 2017).

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

El volcán de San Salvador está representado por un macizo volcánico formado principalmente por intercalaciones de lavas y piroclastos provenientes diferentes eventos eruptivos extendidos en los valles del AMSS y el valle de Zapotitlán, en la subcuenca del río Acelhuate y río Sucio, respectivamente. En relación con la litología en profundidad está es conocida a través de perforaciones, tales como, la realizada en el parque Bicentenario financiada por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el desarrollo en (AECID), en el año 2019. Las unidades descritas en este sector corresponden a los primeros metros a material orgánico y sedimentos, seguido de secuencias de lavas y piroclastos, favoreciendo la presencia de acuíferos.

Por otro lado, en cuanto al comportamiento hidrogeológico (ANDA, 2008), clasifica las zonas de la cuenca del río Acelhuate y río Sucio, de acuerdo con sus propiedades hidráulicas para el uso del recurso hídrico subterráneo delimitando tres unidades principales: acuíferos porosos (color celeste); acuíferos volcánicos fisurados con probabilidades altas de producción (color verde); y acuíferos con limitada productividad (color café). El aprovechamiento de este recurso de agua subterránea se realiza por medio de pozos (color rojo); algunos de estos pozos atraviesan los acuíferos porosos llegando hasta acuíferos volcánicos fisurados con mejores propiedades hidráulicas (Figura 2).

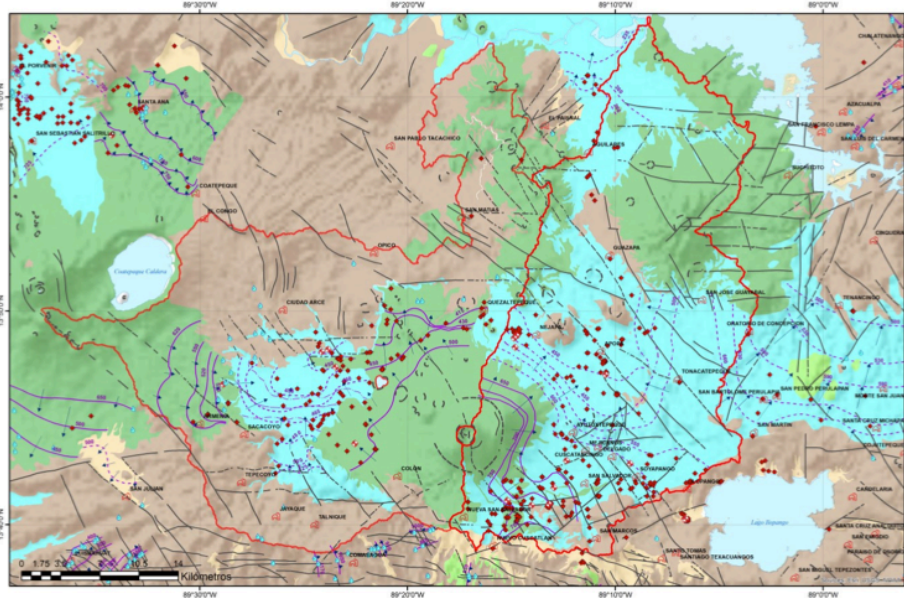


Figura 2. Mapa de comportamiento hidrogeológico. Fuente (ANDA 2008)

Además de la anterior caracterización de los acuíferos, el monitoreo de pozo de agua en el perímetro del CVSS permite definir un comportamiento del agua subterránea en esta región. Tomado como ejemplo, las características de tres pozos: el primero ubicado en el municipio de Nejapa, Estadio Cuscatlán (San Salvador) y Lourdes Colón, en los cuales se ha logrado identificar diferentes ciclos de recarga y descarga del acuífero que se representan en oscilaciones del nivel de agua desde el 2010-2021.

Uno de los eventos de recarga claramente identificables es en el año 2011 debido a periodos de alta precipitación y la interacción de la tormenta tropical 12E. Por el contrario, el año 2015 se caracterizó por un bajo registro de precipitaciones en donde la recuperación del acuífero fue nula. Ahora bien, aunque el año 2020 hubo una recuperación de los acuíferos, existe una clara tendencia hacia la baja de los niveles de agua subterránea.

Tabla 1. *Datos de variación de precipitación para los sectores de Nejapa, San Salvador y Lourdes Colón.*

Año	Media Precipitación (mm)	Nejapa Var. Niv. (m)	San Salvador Var. Niv. (m)	Lourdes Colón Var. Niv. (m)
2011	2217	3.5	3.12	1.1
2015	1432	0.06	0.30	-0.04
2020	1977	0.98	1.3	0.41

Con el fin de lograr un mejor entendimiento de los acuíferos es importante realizar análisis fisicoquímicos, especialmente, las concentraciones de iones mayoritarios que permite identificar la proveniencia de los acuíferos, dirección y líneas de flujo de agua subterránea. Recientemente, se ha incluido en esta investigación la aplicación de isótopos estables de la molécula del agua oxígeno 18 y deuterio en muestras de lluvia en la zona de recarga que han sido correlacionada con muestras de agua de pozos y manantiales hacia la parte de la parte baja de las cuencas de los ríos Acelhuate y Sucio, encontrando similitudes en sus huellas isotópicas con la

precipitación característica del volcán de San Salvador, confirmando que dicha zona representa el área de recarga principal del volcán San Salvador para los acuíferos del AMSS y algunos de la cuenca del río Sucio.

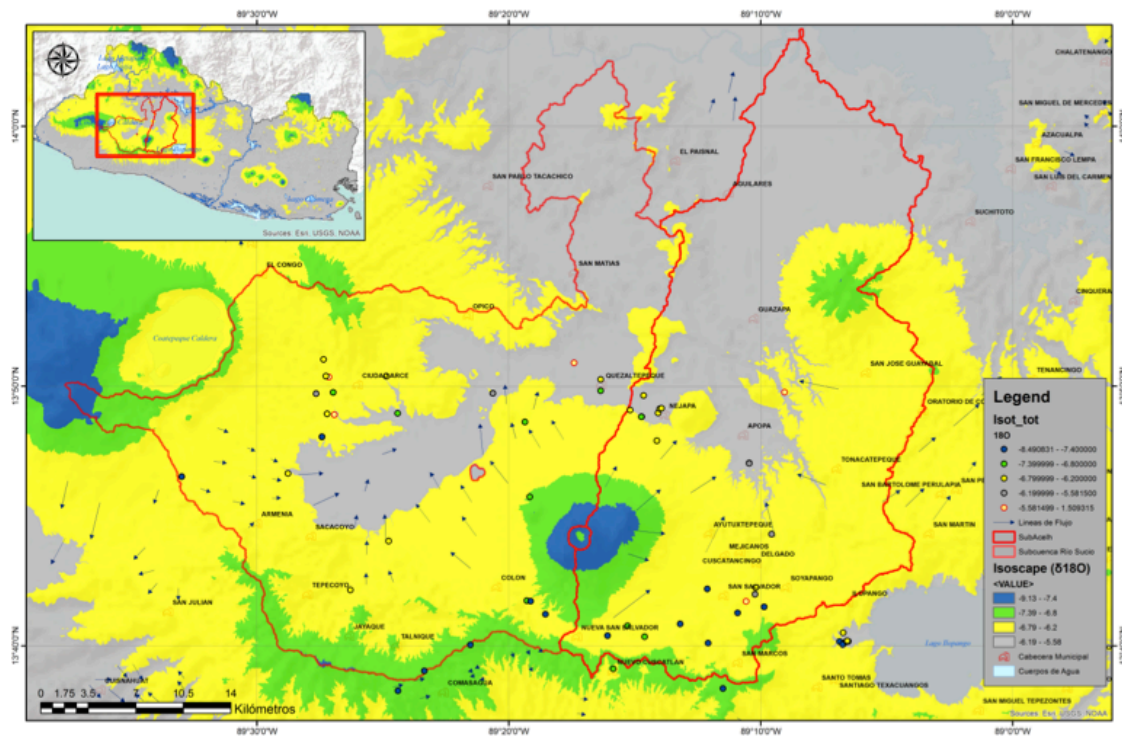


Figura 3. Mapa de caracterización isotópica Oxígeno 18 en las cuencas de los ríos Acelhuate y Sucio.

Referencias bibliográficas

- MARN, 2017. Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico en El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias., San Salvador: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- ANDA-FIAS-COSUDE, 2008. Mapa hidrogeológico de El Salvador. San Salvador (San Salvador).
- ANDA. (2011). Boletín Estadístico 2010 (Boletín N° 32; p. 141). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.
- ANDA. (2012). Boletín Estadístico 2011 (Boletín N° 33; p. 150). Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Hidrogeología

Ponencia 10

La red hídrica superficial del CVSS y la relación con las inundaciones en el AMSS.

Roberto Cerón.

Gerente Hidrología, Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales-MARN



La red hídrica superficial del CVSS y la relación con las inundaciones en el AMSS.

Roberto Cerón

Resumen

La relación que existe entre el volcán de San Salvador y las inundaciones en el Área Metropolitana de San Salvador. Desde el contexto hidrográfico el volcán de San Salvador tiene dos vertientes; la primera hacia el este hacia el río Acelhuate y al oeste hacia el río sucio. La caracterización de la forma de la red de drenaje para ambas cuencas es de forma detrítica pero el sistema de drenaje al alrededor del Volcán de San Salvador se considera como radial exorreica drenando hacia la cuenca del río Lempa. Sin embargo, estas cuencas tienen un componente endorreico, por ejemplo, en la zona de la laguna de Chanmico existen algunos afluentes que drenan hacia esta laguna con posible drenaje subterráneo. También en las cuencas hay componentes influentes (aportan agua hacia los acuíferos) y efluentes (acuíferos aportan desde un lago o río), como es el caso de algunos afluentes que aportan agua hacia el río Acelhuate.

Una zona de características distintas del drenaje en superficie es la zona del Playón constituido por lavas en los sectores de Quezaltepeque generadas durante la erupción de 1917 y 1658. En esta zona no hay escorrentía superficial debido a la infiltración del agua meteórica a través de las fracturas en las lavas hacia los acuíferos generando un importante recurso de aguas subterráneas. Algunas de las características básicas de las cuencas se presentan en la Tabla 1.

En el caso de la cuenca del río Acelhuate la velocidad de flujo de agua superficial es mayor alrededor del cauce principal, debido a la urbanización de varios de los cauces de este sector.

Tabla 1. Datos básicos de las cuencas Acelhuate y río Sucio.

Río	Área	Subcuencas	Longitud cauce ppal.	Pendiente
Acelhuate	720 km ²	46	63.1 km (2-5h)	13°-81°
Sucio	830 km ²	54	66.2 km (10>25h)	15-84 °C

Ahora bien, si consideramos los drenajes del volcán San Salvador hacia la cuenca del río Acelhuate se encuentran diez afluentes principales de la misma forma que hacia la cuenca del río Sucio. Una característica importante cuando se registran precipitaciones en el volcán San Salvador estas se concentran en la parte alta, posteriormente se distribuye en agua de escorrentía por diferentes rutas hasta llegar a las partes bajas. A lo largo de su recorrido el flujo de agua puede arrastrar contaminantes, descarga de aguas servidas que alteran la calidad del cuerpo de agua.

El crecimiento urbanístico del área de influencia del Complejo Volcánico de San Salvador, desde 1984 ha ido incrementando hacia la parte alta del volcán San Salvador, repercutiendo directamente en el comportamiento de las aguas superficiales. Un concepto interesante de las inundaciones desde nuestros ancestros citado en el Popol Vuh (Libro del Consejo o Libro de la Comunidad Mayas K'iche), describe "Una inundación fue producida por el corazón del Cielo; un gran diluvio se formó que cayó sobre la cabeza de los hombres de madera ... Se oscureció la faz de la tierra y comenzó una lluvia negra, una lluvia de día y una lluvia de noche ..."

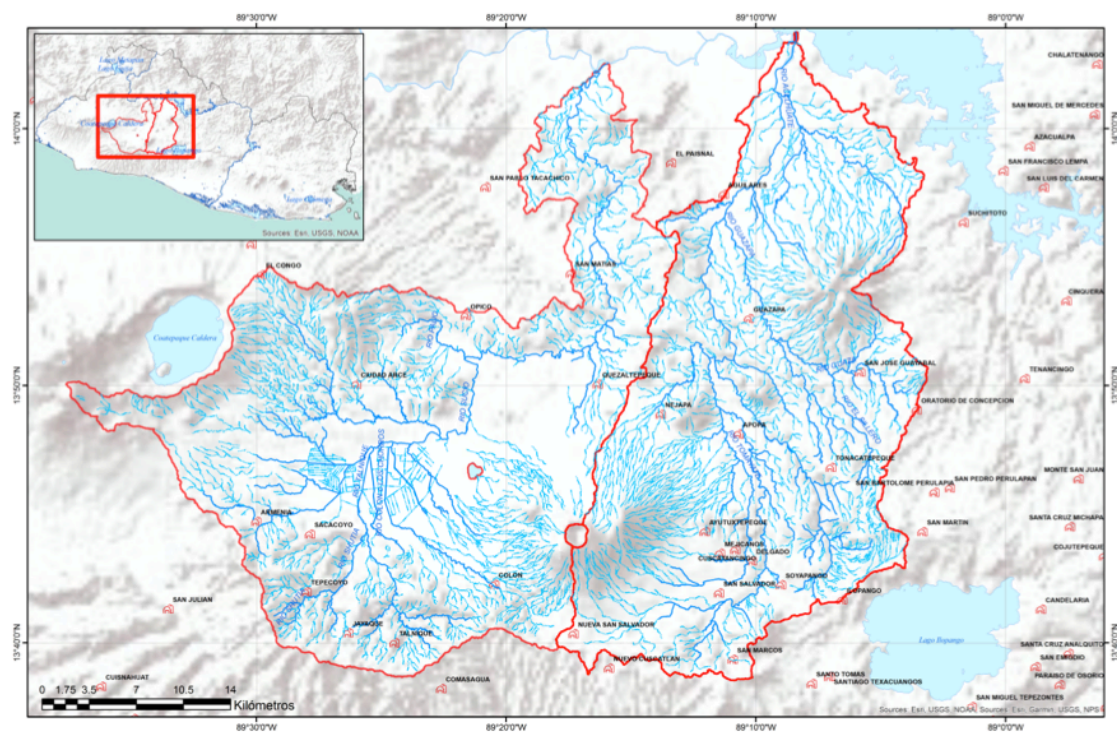


Figura 1. Mapa de distribución de la red de drenaje de las cuencas Acelhuate y río Sucio.

En cuanto a las inundaciones históricas desde la segunda mitad del siglo XVIII destaca por una repetida ocurrencia de fenómenos atmosféricos. Un caso particular es la inundación generada en la zona de Opico y el valle de Zapotitán, por la desviación del río Sucio hacia el norte por el flujo de lava de la erupción de El Playón 1658, algunos paleocauces y depósitos sedimentarios, indican que el cauce del río Sucio tenía un recorrido hacia el NE. Otro registro importante es de la inundación del 12 de junio de 1922, generada en el cauce del río Acelhuate

Las inundaciones presentan registros históricos y presentes. Tal es el caso de las inundaciones generadas por las tormentas Amanda y Cristóbal en el año 2020. Los impactos generados por estos fenómenos meteorológicos se concentraron en la zona inferior y media de la cuenca del río Acelhuate, concentrándose en la zona urbana de San Salvador.

Lo anterior se debe a que se ha generado junto con la urbanización una impermeabilización del suelo reduciendo la filtración y aumentando el flujo de agua superficial. Los principales puntos de desbordamiento en el AMSS son las planicies aluviales, que se refieren a desbordamientos antiguo, por ejemplo, la zona del puente de ISNA siendo una zona baja propensa a generar inundaciones, obstrucciones en los ríos (naturales o antrópicas), como río Arenal Seco Ilopango, confluencia de ríos, tales como, río San Antonio- Quebrada El Níspero, Mejicanos. Un aspecto importante que genera inundaciones son las obras de estrechamiento del cauce como la antigua bóveda Brisas de San Francisco, bóveda colonia Costa Rica, Puente Río Guilapa, Apulo, teniendo en cuenta que este sistema no funciona bajo fuertes presiones del agua y puede colapsar. Adicionalmente, en estos sistemas se acumulan gran cantidad de sedimentos y desechos sólidos arrastrados por el flujo de agua, que reduce la capacidad de la bóveda, obstruyendo el flujo normal del agua causando represamientos y, por ende, inundaciones aguas arriba de las obras. Finalmente, otra de las causas de las inundaciones es la invasión del cauce tomando territorio de urbanización en el cauce original del río, reduciendo la capacidad hidráulica del río, como es el caso de las comunidades asentadas en el río Garrobo, San Salvador, Puente Río Guilapa, Apulo.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Historial Eruptivo

Ponencia 11

Historia geológica (historial de erupciones)
conocida del CVSS.

Dolors Ferres
Universidad Autónoma de México.



Historia geológica (historial de erupciones) conocida del CVSS

Dolors Ferres

Resumen

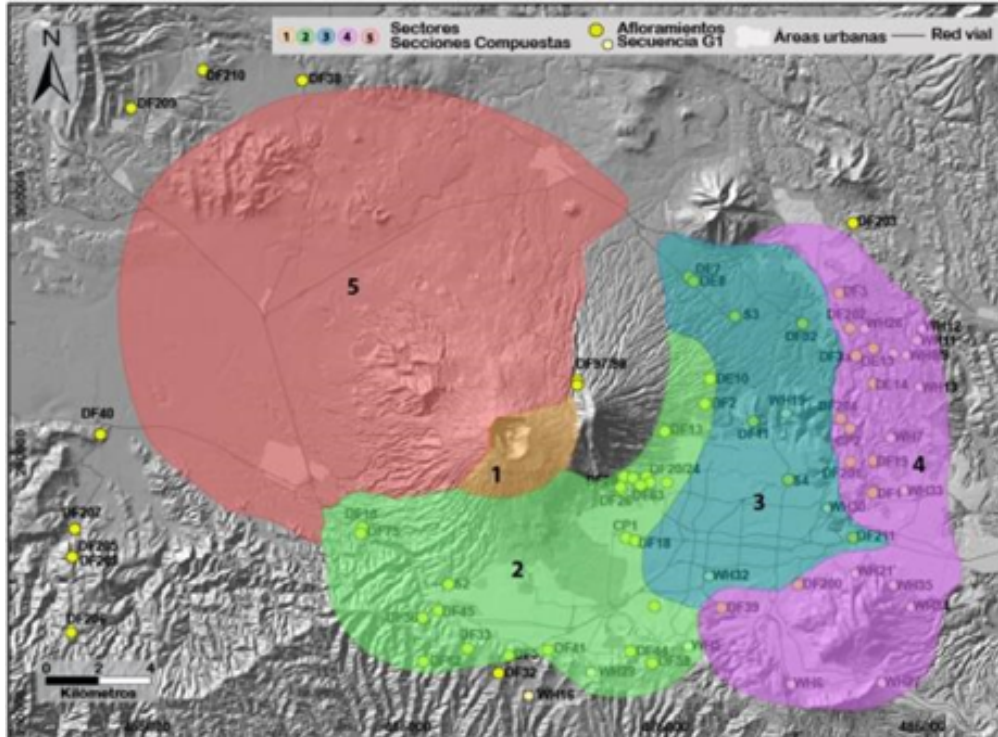
La investigación desarrollada en la tesis doctoral “Estratigrafía, Geología y Evaluación de peligros volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador (El Salvador)”, tuvo por objetivos la revisión de la estratigrafía e historia eruptiva del Volcán Boquerón como base para la caracterización de sus erupciones y la evaluación de su peligrosidad, a través de la definición de escenarios de peligro por diferentes procesos volcánicos y, la elaboración de mapas de peligro volcánico, que puedan constituir herramientas útiles para la preparación de la población, la planificación territorial y la reducción del riesgo volcánico en el entorno del CVSS. La historia geológica y de erupciones del Complejo Volcánico de San Salvador fue revisada y ampliada, en la primera parte de la investigación, de la que se presenta este resumen.

El volcán Boquerón, formado en el interior del antiguo volcán de San Salvador, es el edificio joven y activo del Complejo Volcánico de San Salvador, que integra también 25 volcanes monogenéticos ubicados en sus flancos SE, N y NW. Este complejo volcánico está situado en el centro de El Salvador, rodeado por la capital del país y otras 13 municipalidades del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). Está considerado uno de los seis principales volcanes activos de la Cordillera Volcánica salvadoreña y, uno de los más peligrosos de Centroamérica por su historial de erupciones y por su cercanía a grandes áreas urbanas. Aunque en la actualidad presenta rasgos de actividad muy débiles, la caracterización de su peligrosidad es de gran importancia.

El historial eruptivo conocido del Volcán Boquerón incluye una abundante actividad efusiva y explosiva en el período de los últimos 36,000 años, siendo su última erupción en 1917.

En la presente investigación se revisó y amplió el historial eruptivo de este volcán a través de trabajo de campo detallado (Figura 1), que permitió la identificación de 25 erupciones diferenciadas: tanto erupciones estrombolianas y estrombolianas violentas que produjeron flujos de lava, proyectiles balísticos y caída de cenizas, las más recurrentes. Pero también erupciones de tipo pliniano y subpliniano con la producción de depósitos de caída de gran volumen, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas, indicativos de erupciones de gran explosividad, muchas de las cuales tuvieron un componente freatomagmático significativo (Figura 2).

La caracterización física y química de los principales depósitos de caída (G1, G2 y B1), de flujo y de oleada piroclástica identificados persigue caracterizar los mecanismos eruptivos y determinar los índices de explosividad de las erupciones del volcán Boquerón, así como, definir los criterios para el diseño de diferentes escenarios de peligro volcánico para este volcán.



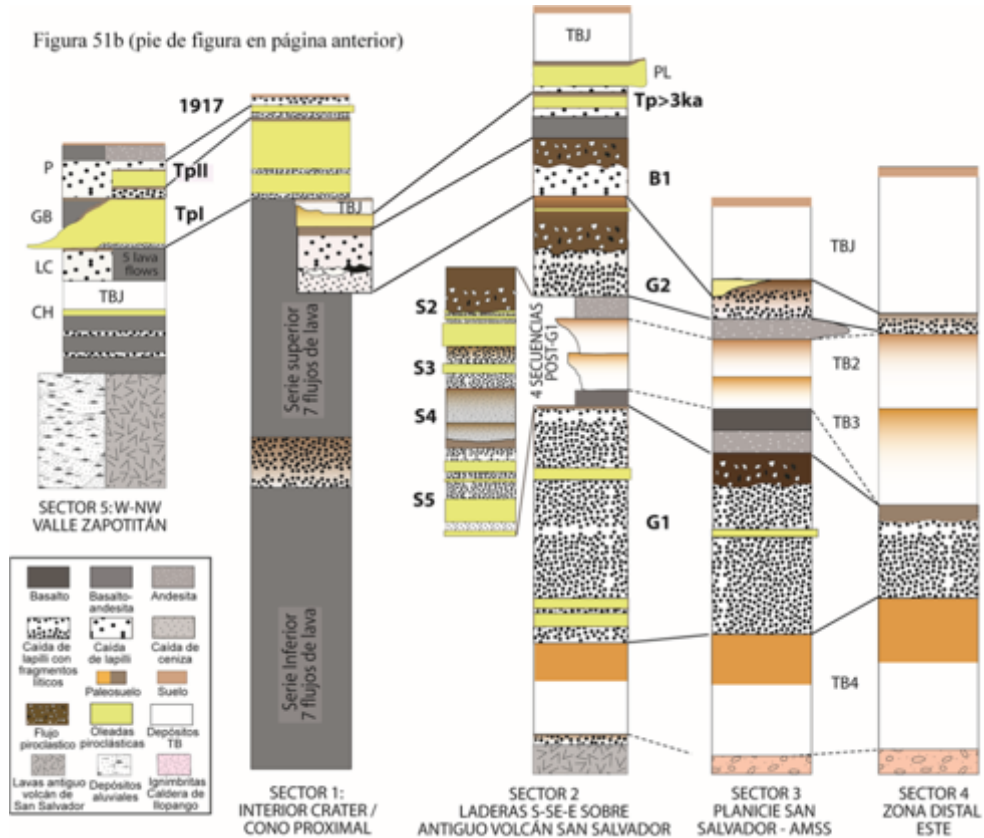


Figura 1. a) Mapa de sectores del Complejo Volcánico de San Salvador, cuya estratigrafía general es representada en las secciones compuestas de la Figura 1b. Como referencia, se señalaron los afloramientos con presencia de la secuencia G1; b) secciones estratigráficas compuestas del VB; en los sectores 2 y 5 se muestra la relación con las secuencias piroclásticas de algunos de los edificios secundarios del CVSS: PL, maar Plan de la Laguna, CH, maar Laguna de Chanmico, LC, anillo de tobas Loma Caldera, GB, lavas Loma de Grandes Bloques y P, cono de escorias El Playón.

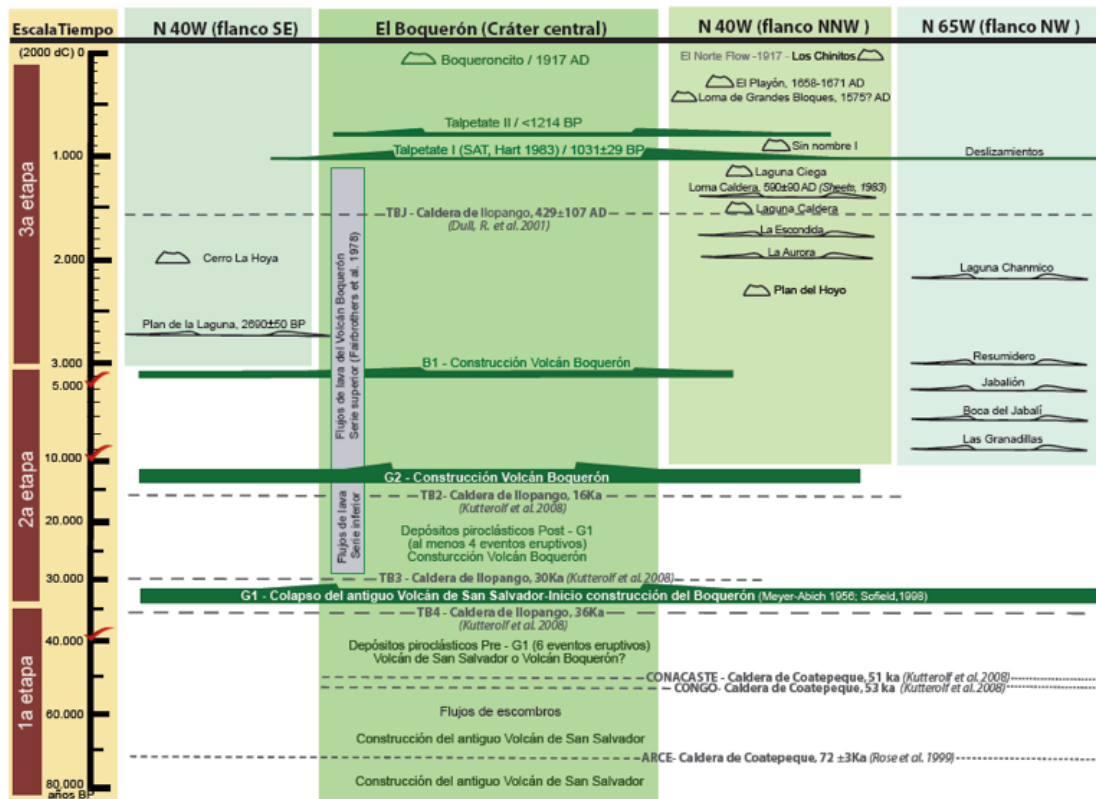


Figura 2. Secuencia general de evolución del CVSS (modificado de Sofield, 1998). El edificio principal se construye en dos etapas: el antiguo VSS inicia su formación antes de los 72,000 (Rose et al. 1999) y estuvo activo hasta cerca de los 36,000 años, coetáneamente a la actividad de la Caldera de Coatepeque. La segunda etapa, consiste en la construcción del cono joven y activo VB, que inicia con los depósitos G1 sobre los depósitos riolíticos de TB4 (36 ka), de la Caldera de Ilopango. Los depósitos del VB se interestratifican con las secuencias de depósitos TB3, TB2 y TBJ de esta caldera. En la última etapa, que abarca los últimos 3,000 años, se intensifica la actividad eruptiva de tipo monogenético, que inicia alrededor de los 10,000 años (Hart 1983; Miller 1992; Sofield 1998; este estudio).

Referencias bibliográficas

- Bosse, H.R., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt-Thomé, M., Weber, H.S., Wiesemann, G., 1976. Carta Geológica de la República de El Salvador (Centroamérica); 1:100,000. Mapas. Herausgegeben von der Bunderstalt fur Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, Germany.
- Dull, R.A., Southon, J.R., Sheets, P., 2001. Volcanism, ecology, and culture: A reassessment of the Volcán Ilopango TBJ eruption in the southern Maya real. *Latin American Antiquity*, 12, 25-44.

- Dull, R.A., Southon, J.R., Kutterolf, S., Freundt, A., Wahl, D., Sheets, P., 2012. Evidence for the Ilopango TBJ eruption as the trigger of the AD 536 event. Abstract. Association of American Geographers Annual Meeting. New York.
- Fairbrothe E., Carr, M.J., Mayfield, D.G., 1978. Temporal magmatic variation at Boquerón Volcano, El Salvador. *Contribution to Mineralogy & Petrology*, 67, 1-9.
- Ferrés, D., Delgado-Granados, H., Hernández, W., Pullinger, C., Chávez, H., Castillo-Taracena, C.R., Cañas-Dinarte, C., 2011. Three thousand years of flank and central vent eruptions of the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and their effects on El Cambio archaeological site: a review based on tephrostratigraphy. *Bulletin of Volcanology*, published on-line. DOI ~~10.1007/s00445-011-0465-0~~.
- Ferrés, D., Delgado-Granados, H., Gutierrez, R.E., Farraz, I.A., Hernández, E.W., Pullinger, C.R., Escobar, C.D., 2013. Explosive volcanic history and hazard zonation maps of Boquerón Volcano (San Salvador volcanic complex, El Salvador), in Rose, W.I., Palma, J.L., Delgado Granados, H., and Varley, N., eds. *Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards*. Geological Society of America Special Paper 498, pp. 1-30. DOI: 10.1130/2013.2498 (12)
- Hart, W., 1983. Classic to Postclassic Tephra exposed in Archeological sites, Eastern Zapotitán Valley of El Salvador. In: Sheets P (ed) *Archeology and Volcanism in Central America* University of Texas Press, Austin, 44-51.
- Hart, W., Steen-McIntyre, V., 1983. Tierra Blanca Joven Tephra from the AD 260 eruption of Ilopango caldera. En: Sheets P (ed) *Archeology and Volcanism in Central America* University of Texas Press, Austin, 14-43.
- Italtekna Italconsult, Consorzio Salvador (Misión Italiana; 1988) San Salvador, programa di ricostruzione: Informe Vulcanológico. Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Repubblica Italiana. Servicio Nacional de Estudios Territoriales. San Salvador, El Salvador, 1-88.

- Kutterolf, S., Freundt, A., Pérez, W., Mörz, T., Schacht, U., Wehrmann, H., Schmincke, H.U., 2008. Pacific offshore record of plinian arc volcanism in Central America: 1. Along-arc correlations, 2. Tephra volumes and erupted masses, 3. Application to fore arc geology. *Geochem., Geophys., Geosystems.*, 9. doi:10.1029/2007GC001631.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Sofield, D., Escobar, C.D., Pullinger, C.R., 2001. Volcano Hazards in the San Salvador Region, El Salvador. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-366.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Pullinger, C.R., Escobar, C.D., 2004. Debris flow hazards at San Salvador, San Vicente and San Miguel Volcanoes, El Salvador, in Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J., (ed) *Natural Hazards in El Salvador*. Geological Society of America. Special paper 375, 89–108.
- Meyer-Abich, H., 1956. Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador. *Anales del Servicio Geológico Nacional*. El Salvador, 3, 66-72.
- Miller, D., 1989. Stratigraphy of volcanic deposits at Cerén. En: Sheets, P., McKee, B., (ed): *Archaeological Investigations at the Cerén Site, El Salvador: a preliminary report 1989*. Department of Anthropology. University of Colorado, Boulder. Reporte interno del Departamento de Arqueología, Dirección Nacional de Patrimonio Cultural. Secretaría de Cultura, 7-17.
- Miller, D., 1992. Summary of 1992 geological investigations at Joya de Cerén. En: Sheets, P., McKee, B., (ed): *Archaeological Investigations at the Cerén Site, El Salvador: a preliminary report 1992*. Department of Anthropology. University of Colorado, Boulder. Reporte interno del Departamento de Arqueología, Dirección Nacional de Patrimonio Cultural. Secretaría de Cultura, 4-7.
- Miller, D., 1993. Summary of 1993 geological investigations at Joya de Cerén. In Sheets, P., McKee, B. (ed): *Archaeological Investigations at the Cerén Site, El Salvador: a preliminary report 1993*. Department of Anthropology. University of Colorado, Boulder. Reporte interno del Departamento de Arqueología, Dirección Nacional de Patrimonio Cultural. Secretaría de Cultura, 8-14.
- Miller, D., 2000. Volcanology, Stratigraphy and Effects on Structures. En: Sheets P. (ed) *Before the Volcano Erupted: The ancient Ceren village in Central America*. University of Texas Press, Austin, 11-20.

Capítulo II.

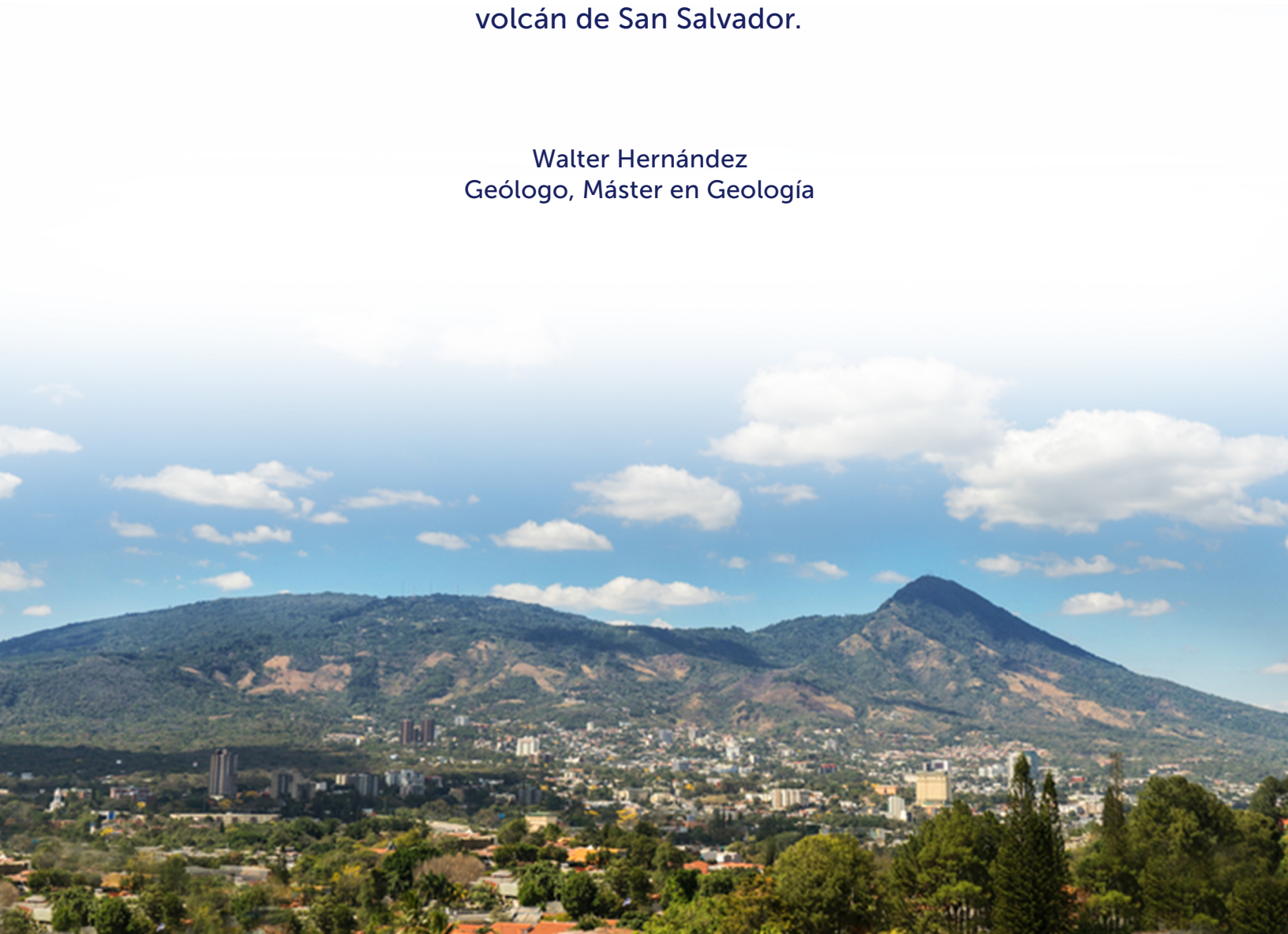
Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geología

Ponencia 12

Avances en el conocimiento sobre el colapso del volcán de San Salvador.

Walter Hernández
Geólogo, Máster en Geología



Avances en el conocimiento sobre el colapso del volcán de San Salvador.

Walter Hernández, Brian Jicha, Oziel García

Resumen

La morfología del viejo volcán de San Salvador (VSS) indica que habría experimentado un desplome, sin embargo, no se sabía de cómo y cuándo eso sucedió, ni donde está la avalancha de escombros (AE). Este trabajo se comenzó a realizar con el objetivo de encontrar respuestas a esas interrogantes.

Se han encontrado afloramientos de la AE en los cauces de quebradas profundas, cortes potentes en carreteras, excavaciones profundas para grandes edificios y perforaciones con recuperación de núcleos. La topografía monticular fue cubierta por los materiales piroclásticos de la caldera de Ilopango y por las erupciones efusivas y explosivas del volcán Boquerón, el cual se anidó en el interior de la caldera que se formó después del colapso del VSS. Esa cobertura sobre la AE fue tan grande que enmascaró todo efecto monticular.

Aspectos importantes se han identificado: 1) La última actividad del VSS fue la erupción de la Ignimbrita Escalón; 2) Los depósitos de la avalancha no tuvieron grandes desplazamientos; 3) La presencia de volcanes monogenéticos alineados con rumbo NW-SE en el volcán; 4) Una perforación profunda con recuperación, testigos al pie del volcán puso de manifiesto la presencia abundante de materiales de alteración hidrotermal.

Lo que se concluye, preliminarmente, es que el núcleo debilitó al edificio volcánico hasta llegar al colapso en dos eventos. Uno mayor, el primero y cuyos escombros cayeron sobre los materiales que yacían alrededor del volcán, formados por la Ignimbrita Soyapango de la caldera de Ilopango y, estos fueron cubiertos por una delgada capa de cenizas distales de la erupción Los Chocoyos (75 ka), de la caldera Atitlán, Guatemala y, sobre esta se depositaron otras erupciones grandes. El segundo correspondió a las partes sur, cuyo remanente corresponde al cerro El Jabalí.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Sismología

Ponencia 13

Red sísmica del AMSS y enjambres sísmicos en la zona del CVSS.

Griselda Marroquín

Coordinadora de sismología. Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador.



Red sísmica del AMSS y enjambres sísmicos en la zona del CVSS

Griselda Marroquín

Resumen

Se presenta la evolución y estado actual de la red sísmica, así como las características de la sismicidad registrada en el área del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS), el cual está constituido por un estratovolcán central compuesto, el volcán joven y activo Boquerón, anidado en el interior del antiguo volcán de San Salvador y, por veinticinco edificios volcánicos monogenéticos que se ubican en sus flancos y planicies aledañas al SE, NW y N del edificio principal¹.

El monitoreo sísmico en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) comenzó en 1930, con la instalación de la estación San Salvador (SSS) en el Observatorio Nacional, estación que fue modernizada en 1955-1956, en donde la sismicidad era registrada en bandas de papel ahumado. Es importante resaltar que el Observatorio Nacional fue fundado en 1918, posterior a la erupción del volcán San Salvador en 1917. En esta estación se registró el terremoto del 3 de mayo de 1965 ($M_s=6.0$), así como sus premonitores y réplicas, el cual ha sido uno de los más grandes en el AMSS.

Desde 1961 y hasta 1983, se tiene ubicación de sismos utilizando la estación SSS (Figura 1), con respecto a los años anteriores algunos de los datos que se reportaba en los boletines sísmicos era la cantidad de sismos que se registraba a diario, su hora de ocurrencia, pero no se reportaba información de su ubicación.

En los años 1983- 1984 se instala la primera red sísmica telemétrica en donde tres de las doce estaciones de la red se instalaron en el AMSS. Estas estaciones contaban con un sistema fotovoltaico, un sistema de transmisión, y el sensor sísmico era enterrado, el registro sísmico se realizaba mediante un tambor con papel térmico en donde se hacían las lecturas de los sismos de forma manual y los epicentros sísmicos se ubicaban usando tablas de tiempo de viaje o introduciendo las lecturas sísmicas al programa de cómputo Hypo 71. Estas estaciones registraron el terremoto de 1986, cuyas replicas duraron por varios meses.

¹ Ferrés López, M. D., 2014. Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador. (El salvador). Tesis doctoral, Universidad Autónoma de México, México.



Figura 1. Mapa de ubicación de sismicidad en los años 1961-1983. Puntos rojos (epicentros), triángulo amarillo (estación sísmica).

Entre 1991-1992 se instalan once (11) estaciones para la vigilancia sísmica y volcánica del AMSS, con registro sísmico en formato digital. Sin embargo, debido al vandalismo en el sector varias de las estaciones dejaron de operar a los pocos años de su instalación.

Para el año 2003 se reemplazan estaciones acelerográficas con registro en película fotográfica por estaciones de registro digital y por primera vez los datos de este tipo de estaciones se comienzan a utilizar para la ubicación de los sismos y cálculo de magnitud. En este mismo año, se adopta Earthworm, como software de adquisición y procesamiento de la sismicidad que ocurre en los volcanes, generándose gráficos de la amplitud sísmica en tiempo real (RSAM), espectrogramas y sismogramas. En el 2004, se instala la primera estación sísmica de banda ancha, en el sótano de las instalaciones del MARN, con el propósito de tener un mejor registro de la microsismicidad y de los sismos de gran magnitud.

En el 2011 y 2014, gracias a fondos nacionales y cooperaciones con el gobierno de Japón, se adquieren más estaciones sismográficas y acelerográficas, con transmisión de datos en tiempo real. Un suceso importante es en el año 2012, en donde se implementa el localizador automático de sismos usando SEISCOMP3.

Actualmente, se tiene veinticuatro (24) estaciones sísmicas en el AMSS-CVSS y alrededores, de las cuales catorce son acelerográficas, tres de banda ancha y siete de periodo corto (Figura 2).

¿Tenemos una red óptima para el monitoreo del Complejo Volcánico de San Salvador a 2021?: no, porque hacia la parte norte (N), noroeste (NW) y oeste (W), hace falta disponer de más estaciones para rodear la estructura volcánica (Figura 2) y, así poder conocer mejor la sismicidad que se genera en el volcán de San Salvador.

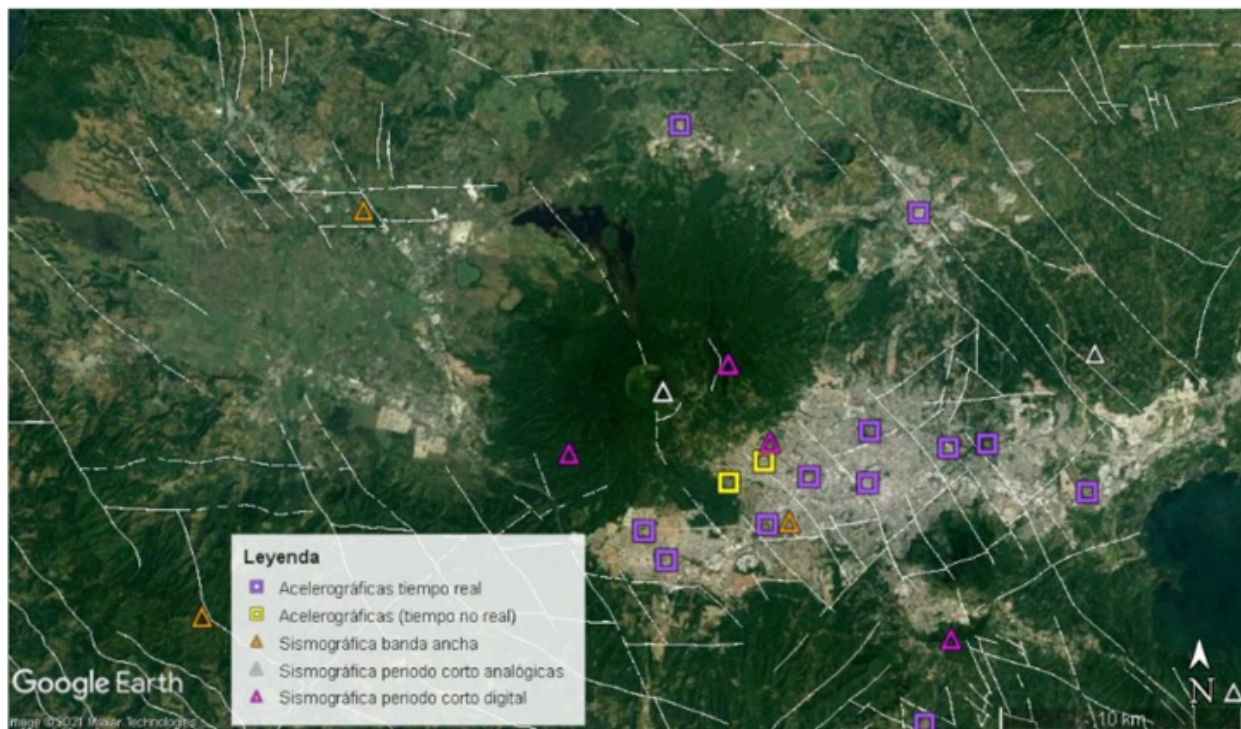


Figura 2. Mapa de estaciones sísmicas. Acelerográficas en tiempo real (rectángulos morados), acelerográficas tiempo no real (rectángulos amarillos), sismográficas de banda ancha (triángulos anaranjados), sismográficas período corto analógicas (triángulos blancos), sismográficas período corto digital (triángulos rosados), fallas geológicas (líneas grises).

Sin embargo, con la red sísmica actual, es posible conocer algunas de las características de la sismicidad de la zona, entre ellas su distribución espacial, su magnitud, su profundidad.

En la Figura 3, se observa que para los diferentes periodos de tiempo los sismos se concentran en las mismas zonas, entre ellas podemos mencionar: la zona de San Andrés-Zapotitán, estructura principal de CVSS, Área Metropolitana de San Salvador, cerro San Jacinto. Además, es importante destacar que la sismicidad en la estructura principal de CVSS queda mejor evidenciada en el período 2011-2021. Sin embargo, es probable que en años anteriores la sismicidad registrada fue menor debido a la falta de estaciones sísmicas y no a la poca ocurrencia de sismos.

En cuanto a la magnitud de los sismos, en la Figura 4 se puede observar que predominan los de pequeña magnitud ($M \leq 2$) en la estructura principal del CVSS, y sus profundidades focales son menores a los 5 kilómetros. Por otro lado, sismos de magnitud $4 < M \leq 5.7$ en un período de 37 años solo han ocurrido en las zonas del AMSS y de San Andrés-Zapotitán (Figura 4).

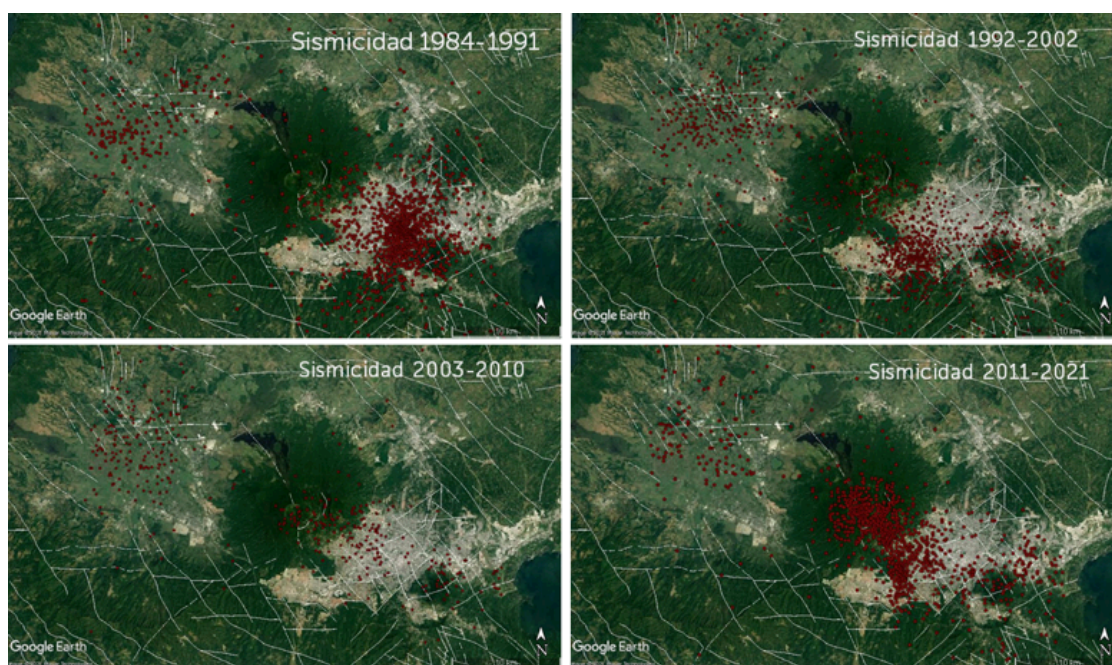


Figura 3. Distribución de sismicidad para diferentes periodos de tiempo, en los que la red sísmica fue incrementada. Nótese que para todos los periodos la sismicidad se concentra en las mismas zonas: San Andrés – Zapotitán (al noroeste), estructura principal del CVSS, área metropolitana y cerro San Jacinto.

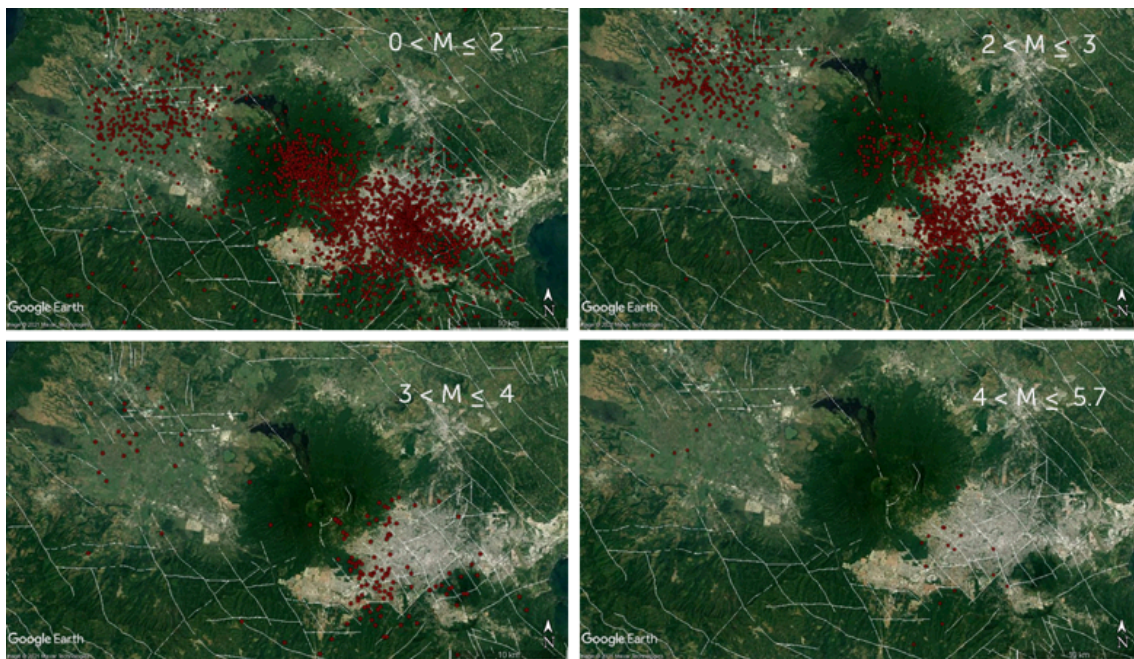


Figura 4. Distribución de sismicidad para diferentes rangos de magnitud.

En relación con la cantidad de sismos que ocurren por día, se han identificado para los años 1984-2021, seis períodos sísmicos en donde la sismicidad fue bastante intensa, estos se describen a continuación.

- **Sismicidad – octubre de 1986²:** se registraron más de 10 mil sismos, entre octubre 1986 febrero de 1987. El sismo de magnitud máxima fue de 5.7 (Mw), el día 10 de octubre, con una intensidad IX (MM) y un valor de aceleración horizontal de 0.72 g. Véase concentración de epicentro en el AMSS, en la Figura 3.
- **Sismicidad – octubre de 1990³:** se registraron 259 sismos en Ateos-Sacacoyo, con una magnitud máxima de 3.2.
- **Sismicidad – enero- febrero 2001:** ocurrieron dos terremotos, el primero el 13 de enero de magnitud 7.7 (Mw), frente a la costa de Usulután debido a la subducción de la placa Cocos-Caribe, convirtiéndose en uno de los sismos más grandes en la historia de El Salvador. El segundo sismo de magnitud 6.6 (Mw), se dio un mes después en el segmento de fallas de San Vicente.

² <http://mapas.snet.gob.sv/sismologia/enjambres/amss.pdf>

³ <http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/enjambres+sismicos/>

Estos sismos lograron activar distintos segmentos de fallas en el graben central de El Salvador, generándose sismos en el valle de San Andrés, AMSS, cerro San Jacinto, entre otros lugares. El sismo más significativo en el AMSS ocurrido en este periodo de tiempo se dio el 17 de febrero de 2001, con una magnitud de 5.1 (Mw), con epicentro entre Antiguo Cuscatlán y San Salvador (ver concentración de epicentros, en Figura 3).

- **Sismicidad – mayo de 2008⁴:** se registraron 87 sismos en el AMSS, entre el 25 y 28 de mayo de 2008, de los cuales 55 fueron localizados, seis sentidos con una intensidad máxima en la escala de Mercalli modificada de V y la magnitud máxima registrada fue de 4.7 (ML).
- **Sismicidad – abril de 2017⁵:** esta sismicidad ocurrió en el AMSS, en tres episodios: Episodio 1 (6 de abril, 10 sismos, 2 sentidos); Episodio 2 (del 9 al 18 de abril, 532 sismos, 53 sentidos, ML 5.1 (10 de abril), intensidad V-VI (MM)). Episodio 3 [22 de abril al 2 de mayo, 80 sismos, 15 sentidos, ML 3.9 (23 abril)]. En este caso, el mecanismo focal de los principales sismos indicó un fallamiento de tipo transcurrente.
- **Sismicidad – septiembre 2020⁶:** se registraron 106 sismos en la estructura volcánica principal del CVSS, 55 sismos localizados, 15 sismos sentidos, 3.6 ML magnitud máxima. Es importante indicar que cuando se presenta sismicidad en las estructuras volcánicas se realiza un estudio más detallado de las frecuencias de los sismos y se realizan visitas a campo para verificar si existe un cambio anómalo en otros parámetros de monitoreo como temperaturas y emisión de gases. En este caso concreto, no se identificó anomalías en los parámetros antes mencionados.

Finalmente, se considera que el despliegue de estaciones sísmicas ha permitido identificar las zonas con mayor sismicidad en los últimos 37 años, así como, sus principales características. Siendo importante densificar la red sísmica en la estructura principal del CVSS, dado que la actividad sísmica puede ocurrir con años, meses o días previos a una activación volcánica. Por lo tanto, es necesario un monitoreo continuo y sistemático, de la actividad sísmica en el CVSS.

⁴<http://mapas.snet.gob.sv/sismologia/enjambres/zapotitanmay2008.pdf>

⁵<http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/enjambres+sismicos/ano+2017/amss+informe+tecnico+4/>

⁶<http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/enjambres+sismicos/ano+2020/informe+tecnico+2/>

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Sismología

Ponencia 14

Sismicidad cerca del volcán San Salvador y fallamiento en domino "*bookshelf*."

Denis Legrand
Universidad Autónoma de México.



Sismicidad cerca del volcán San Salvador y fallamiento en domino "*bookshelf*."

Denis Legrand

Universidad Autónoma de México

Resumen

La sismicidad de El Salvador se distribuye, por una parte, en el contacto de la placa oceánica de Cocos, que subduce debajo la placa Caribe y, en la corteza a poca profundidad inferior a 15 kilómetros. Estos tipos de sismos corticales son responsables del 90 % de los daños de las ciudades países como Guatemala, Nicaragua y El Salvador. Por el contrario, los sismos de la zona de subducción que tienen magnitudes más grandes son los responsables solamente del 10 % de los daños. De acuerdo con un historial de los sismos sentidos en San Salvador, desde 1526 hasta 2017, se identificaron diecisiete (17) en el siglo XIX y seis (6) en el siglo XX.

Por lo anterior, es de primordial importancia estudiar estos sismos corticales y sus efectos sobre la ciudad San Salvador y distinguir entre un enjambre sísmico, tectónico o volcánico.

Por ejemplo, sus localizaciones permiten reconocer fallas activas, y su distribución temporal permite estimar su período de retorno. El cálculo de sus magnitudes permite tener una idea del peligro sísmico y su posible relación con la reactivación volcánica.

Los estudios de terremotos pasados permiten entender su relación con una erupción volcánica generada por un terremoto. Tal cómo es el caso de los dos terremotos de 1917 que culminó en la erupción del volcán de San Salvador. A continuación, se presentan algunos de los terremotos relacionados temporalmente con una sucesiva actividad volcánica (Tabla 1).

Tabla 1. *Terremotos relacionados temporalmente a una actividad volcánica en El Salvador.*

Terremoto	Volcán
1650	1658. Erupción EL Playón (Volcán monogenético al lado del volcán San Salvador)
1656 (¿1658?)	Volcán EL Playón
1879 – 1880	Ilopango (Erupción efusiva: formación islas quemadas)
1917	Volcán San Salvador

En esta investigación se toma de referencia el enjambre de 2017, abordando las siguientes temáticas: contexto geodinámico y localización del enjambre sísmico, distribución espacial y temporal de la sismicidad, selección del plano de falla, distribución de magnitudes y deformación del terreno, estaciones de GPS, mecanismos focales e interpretación.

Iniciando con el contexto geodinámico, El Salvador se encuentra dentro de una zona de subducción oceánica entre la placa de Cocos y la placa Caribe, con velocidades de convergencia, que varían entre 72 y 75 mm/año, según la longitud a lo largo de la fosa. Estos vectores de velocidades son perpendiculares a la fosa en Guatemala y El Salvador, sin embargo, como la geometría de la fosa cambia de dirección al nivel de Nicaragua, estos vectores ya no son perpendiculares a la fosa, sino que tienen un ángulo de 8°, respecto a la normal a la fosa.

Estos cambios tienen, principalmente, dos consecuencias: la primera, es la generación de una microplaca, conocido en inglés como fore-arc sliver, que se desplaza en dirección NW, desde Costa Rica hacia Guatemala, con velocidades de 12 mm/año a 13 mm/año. La segunda consecuencia es la generación de una gran falla de rumbo tipo dextral, que atraviesa El Salvador, Nicaragua y Guatemala. Es en esta frontera donde se encuentra la cadena volcánica paralela a la fosa oceánica.

Los terremotos en esta región son de mecanismo focales de rumbo, pero varían en el plano de falla. Por ejemplo, los terremotos de 1965 y 2001 tuvieron un plano de falla paralelo a la fosa, es decir, al sistema de fallas de rumbo de El Salvador. En cambio, los terremotos de 1986 y 2017, tienen un plano de falla perpendicular a dicho sistema.

Un esquema para explicar la condición tectónica de convergencia oblicua en Costa Rica y Nicaragua, es el mostrado en la Figura 1, en donde se tiene una placa oceánica que subduce a una placa continental, con un vector de convergencia oblicuo respecto a la fosa.

Este vector de convergencia se divide en una componente normal a la fosa (flechas en rojo) y una componente paralela a la fosa (flechas en azul). El vector rojo va a generar terremotos interplaca entre las placas oceánica y continental con mecanismos focales inversos. El vector azul va a generar terremotos corticales con mecanismos focales de rumbo. Son más peligrosos porque, generalmente, más cerca de la superficie.

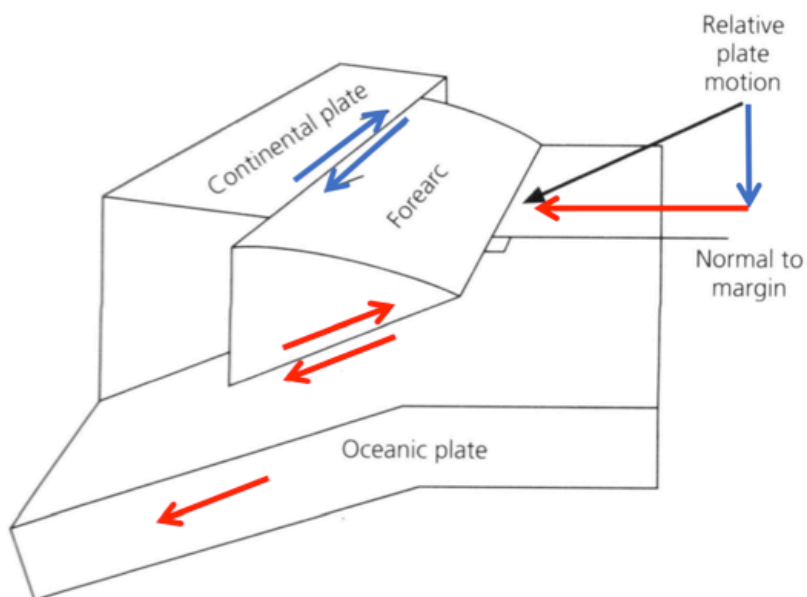


Figura 1. Esquema ilustrativo de una convergencia oblicua (Stein, 2003).

Los terremotos del enjambre sísmico ocurrido en el período de abril-mayo de 2017 se localizan al SE del Complejo Volcánico de San Salvador, aproximadamente, a una distancia entre 5 y 7 kilómetros del volcán San Salvador.

El evento principal de este enjambre sísmico se generó el 10 de abril de 2017, con una magnitud inicial ML: 5.1 recalculada a Mw: 4.8. Este enjambre contiene 77 sismos precursores y 445 réplicas.

Estos sismos fueron localizados gracias a una red de 52 estaciones (El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua), 11 estaciones a menos de 5 km de la zona del enjambre. Lo anterior, permitió localizar los sismos con precisión, determinar los mecanismos focales y seleccionar el plano de falla del evento principal.

El mecanismo focal del evento principal permite identificar dos planos nodales: el primero plano en una dirección NE; y el segundo, en dirección NW.

¿Entonces cuál de los dos es el plano de falla?

La distribución espacial de los sismos del enjambre de 2017 permite contestar a esa pregunta. Como las réplicas se alinearon en una dirección N-NE, esa dirección corresponde al plano de falla.

Las profundidades de la mayoría de los sismos están entre 0 y 6 kilómetros, distribuidos de manera vertical, conforme a un mecanismo focal de rumbo.

Las réplicas se dividen en dos “paquetes”, bien diferenciados en el tiempo y energía. Este fenómeno ya se ha presentado en eventos anteriores. El número de réplicas decae con el tiempo en 15 días para el primer “paquete” y, en 40- 45 días para el segundo “paquete”. El valor *b* de la ley de Gutenberg-Richter, que da la distribución de magnitudes de este enjambre de 2017, es típico de sismos de carácter tectónico. Otro de los parámetros analizados en este evento de 2017, fue la deformación del terreno a partir de datos GPS.

Según está información los vectores de velocidad, calculados entre enero 2000 a marzo 2020, corregidos de los desplazamientos de los terremotos de 2009 y 2012,

calculados tomando como referencia el Fore-arc Silver, indican un desplazamiento hacia el NE; lo cual tiene correlación con el mecanismo de movimiento de falla de rumbo dextral en este segmento.

Una de las recomendaciones de esta investigación es colocar más estaciones de GPS en la dirección NS, para calcular el gradiente de desplazamiento y entender la deformación en esta zona.

Algunos aspectos importantes, que pueden ser estudiados a partir de la información de deformación registrada en estaciones GPS, son:

- Definir el límite norte del Fore-arc Silver.
- Estudiar el acoplamiento con placa del Caribe y el Fore-arc.
- Estudiar acoplamiento entre la placa de Cocos y Fore-arc. (Que permitirá entender porque no hay fuertes sismos interplaca de subducción desde 1915 en la parte central de El Salvador).
- Mejorar el entendimiento de sismos intraslab (que pueden ser fuertes y reactivar fallas corticales, generado por sismos superficiales peligrosos y reactivación volcánica).

La revisión de la deformación de estaciones de GPS a menos de 5 km del volcán de San Salvador ha permitido identificar variaciones temporales de la deformación. Por ejemplo, la estación al volcán San Salvador registró entre 2008-2010 un comportamiento de deflación y, entre 2010-2012 de inflación. No se presentó cambios de desplazamiento en el volcán, durante ni después del terremoto de 2017. En resumen, los terremotos de 1965 (Ms 6.0), 2001 (Mw 6.6), en El Salvador y los terremotos de 2014 (Mw 6.6) en Nicaragua, tienen un plano de falla paralelo a la

fosa. En cambio, los terremotos de 1986 (Mw5.7), 2017 (Mw4.8) en El Salvador y los terremotos de 1972 (Mw6.2) y 2005 (Mw6.3), en Nicaragua tienen planos de falla en una dirección perpendicular a la fosa.

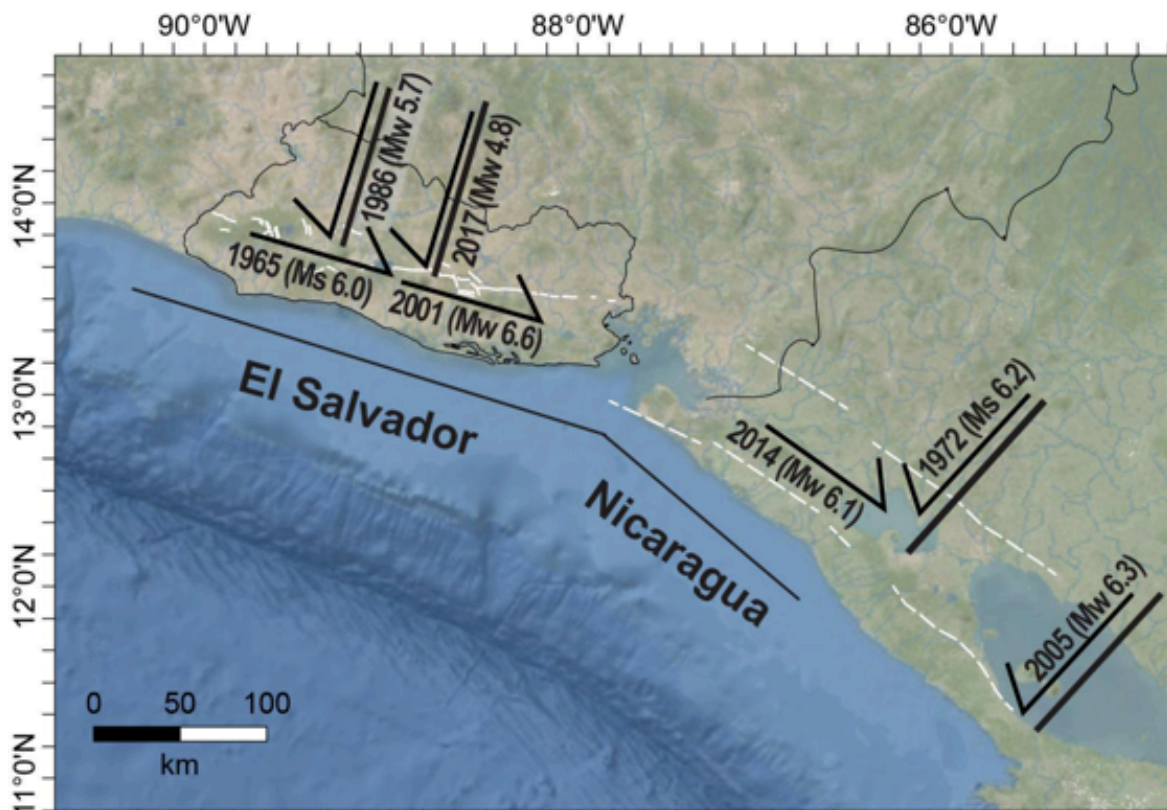


Figura 2. Dirección de los planos de falla de los terremotos de El Salvador y Nicaragua.

Estas dos direcciones perpendiculares de los planos de falla se pueden explicar en un contexto tectónico de bloques configurado en forma de libros, que rotan en el sentido horario, (clock-wise, rotating bookshelf), generando fallas en dirección NE, con un mecanismo de rumbo sinistral.

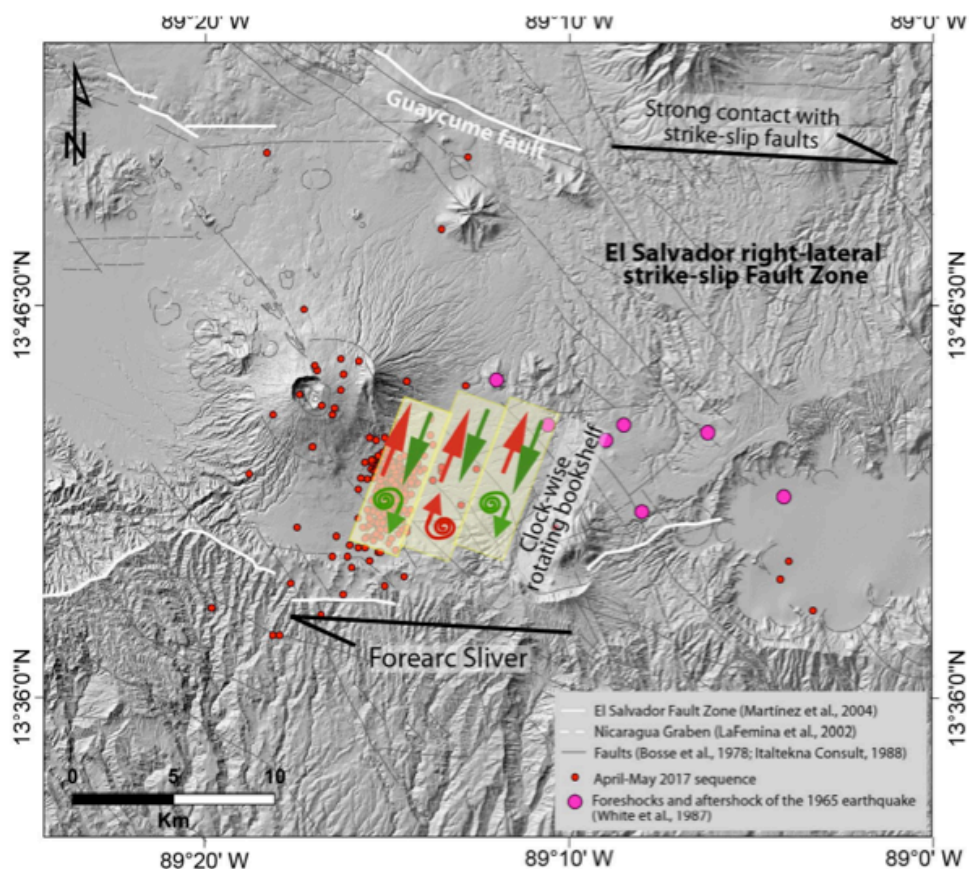


Figura 3. Distribución de las réplicas del enjambre de 2017, formando bloques en forma de libros que rotan en el sentido horario, con planos de falla en la dirección NE.

De esta forma, es importante resaltar que un enjambre sísmico cerca de un volcán siempre tiene dos aspectos: una influencia tectónica (fallas) y, una influencia del volcán donde movimientos de magma profundo pueden reactivar fallas. Sismos menores a 30 kilómetros son considerados como sismos volcano-tectónicos (VTs). Estos sismos corticales, a pesar que son más pequeños de los sismos de subducción, son más peligrosos porque están más cercanos a las viviendas y, por eso la importancia de su estudio.

Referencias Bibliográficas

Stein, S (2003). An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure is available from Blackwell Publishing.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Vulcanología

Ponencia 15

Modelo conceptual preliminar del CVSS, basado en la historia eruptiva conocida e interpretación de la sismicidad local

Demetrio Escobar, vulcanólogo.
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,
Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador



Modelo conceptual preliminar del CVSS, basado en la historia eruptiva conocida e interpretación de la sismicidad local.

Demetrio Escobar

Resumen

Se presenta el Modelo conceptual preliminar del CVSS, concebido bajo los siguientes criterios: a) interpretación de datos sísmicos y geoquímicos del monitoreo realizado, b) interpretación del ambiente tectónico y la actividad eruptiva pasada, c) estudio de la petrología de las lavas emitidas y e) el concepto del estado de actividad actual del volcán. Logrando a partir de ello, tener una idea de la física de su sistema magmático, su estado actual y probable comportamiento futuro.

El Complejo Volcánico San Salvador (CVSS) y en concreto el volcán de San Salvador/Boquerón, es uno de los volcanes salvadoreños históricamente activos y sísmicos, razón por lo que representa un peligro latente para la población ubicada a 10 km de su cráter central Boquerón, incluyendo el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) y, otras 13 municipalidades localizadas en sus flancos, por lo que es considerado uno de los volcanes de más alto riesgo del Arco Volcánico Centroamericano.

Se trata de un volcán prototipo que data de más de 100 ka de edad, el cual, al alcanzar una altura crítica, su tercio superior colapsa formando un cráter o caldera de 6x5 Km, dentro del cual la reactivación volcánica construye un nuevo volcán que conocemos como Volcán Boquerón.

El CVSS - volcán San Salvador/Boquerón se ha mantenido en reposo por más de 104 años, pero, tal como se ha dicho antes, se le conoce un largo historial de erupciones de tipo magmático y freatomagmático por diferentes centros eruptivos, la mayoría por los flancos, en los últimos 3 ka.

En la actualidad no presenta signos de actividad en superficie, su actividad es latente. No se descarta que pueda despertar de manera súbita previo a sismos discretos y enjambres sísmicos vinculados con alguna inyección magmática, tal como ha ocurrido en las erupciones históricas.

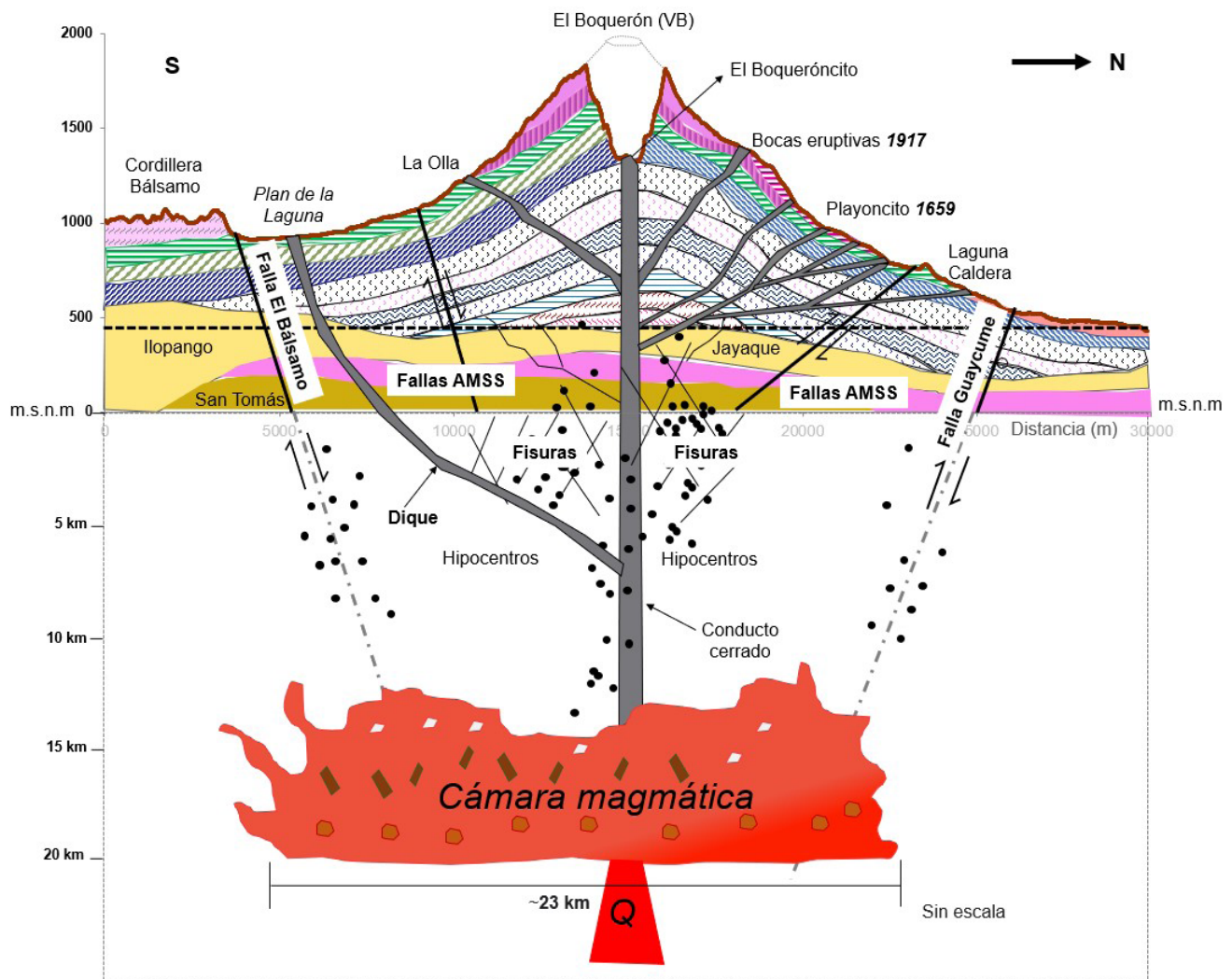


Figura 1. Modelo conceptual preliminar Complejo Volcánico de San Salvador-CVSS.

Capítulo II.

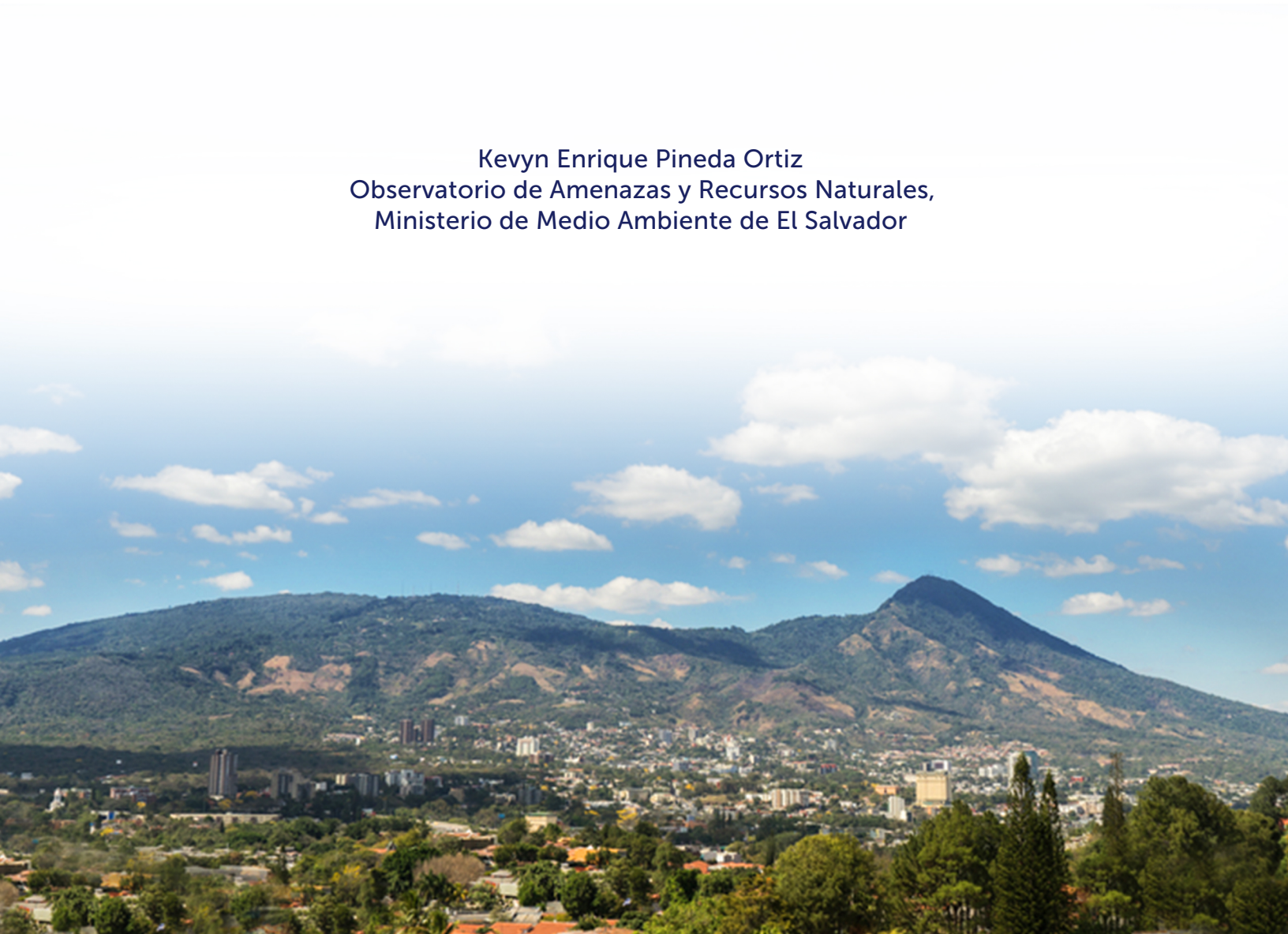
Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Vulcanología

Ponencia 16

Mapeo geofísico en el flanco sur del volcán San Salvador

Kevyn Enrique Pineda Ortiz
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales,
Ministerio de Medio Ambiente de El Salvador



Mapeo geofísico en el flanco sur del volcán San Salvador

Kevyn Enrique Pineda Ortiz

Resumen

El Salvador es un país sísmicamente activo con más de 3000 afectaciones en los últimos años por terremotos de gran magnitud; esta actividad está relacionada con dos fuentes sísmicas la primera es la zona de subducción entre las placas de Cocos y Caribe que genera el arco volcánico; que se extiende desde México y Guatemala hasta la parte central de Costa Rica; y la segunda, se debe a la activación de fallas o fracturamiento local asociado al arco volcánico de Centroamérica en el territorio Salvadoreño.

Este contexto volcánico genera las principales litologías de El Salvador que corresponden a los materiales geológicos de la formación bálsamo, Cuscatlán y formación San Salvador.

En ese mismo contexto, el área del Complejo Volcánico de San Salvador está compuesto por rocas piroclásticas hacia la parte norte y en la zona de estudio hacia el sector sureste está constituido por rocas originadas por flujos de lava del volcán San Salvador y Boquerón.

La selección del área de estudio hacia el flanco sur del Volcán San Salvador se definió teniendo en cuenta la cartografía de lineamientos estructurales realizada por Bosse, et al, 1978 en donde hacen referencia a una falla inferida que se extiende desde el sector de Plan de Laguna hasta el cráter de edificio volcánico del actual volcán Boquerón.

El objetivo de esta investigación fue caracterizar las propiedades geofísicas de respuesta del campo magnético y resistividad de las rocas en una zona definida como de falla e identificar en el área de influencia otro comportamiento similar no cartografiado, relacionado con el sistema fallas del área.

Los métodos geofísicos seleccionados para este estudio fueron: método magnético, método electromagnético de muy baja frecuencia (VLF) y tomografía de resistividad eléctrica (ERT).

La ubicación de los perfiles adquiridos con los métodos geofísicos mencionados anteriormente se presenta en la Figura 1. En total se realizaron cinco (5) perfiles dentro de los cuales se hicieron seis (6) tomografías de resistividad eléctrica.

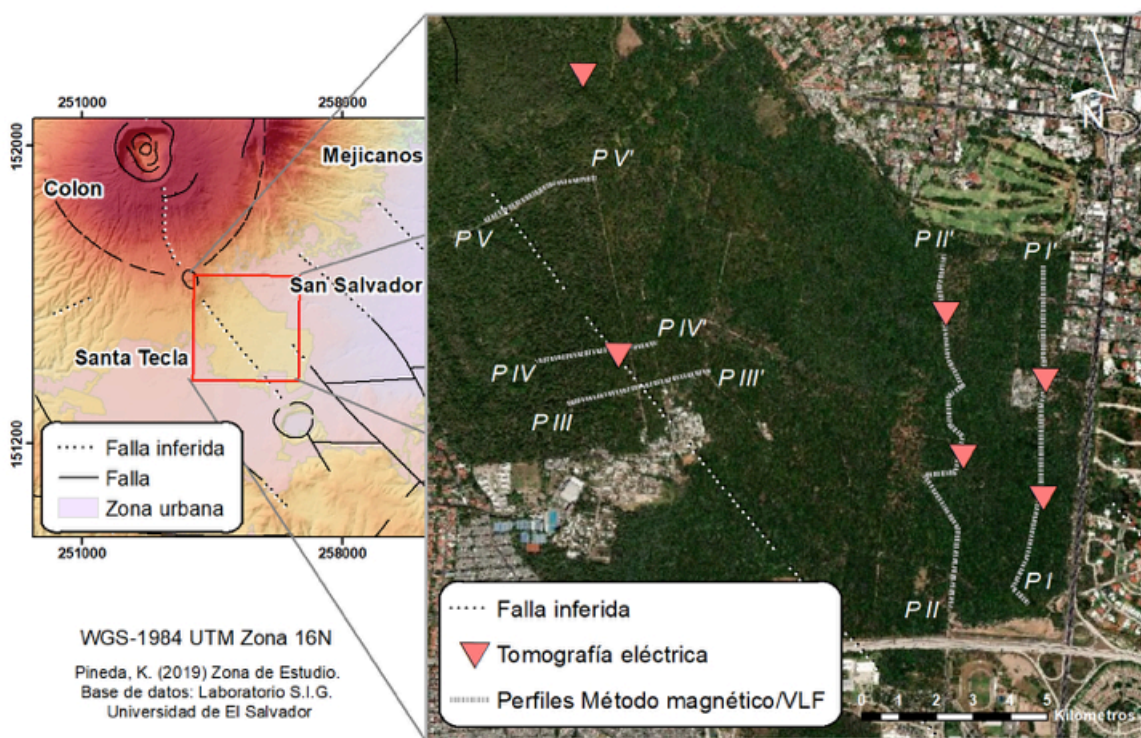


Figura 1. Ubicación de los perfiles realizados en el flanco sur del Volcán de San Salvador.

El primer grupo de perfiles aplicando los métodos magnéticos y VLF fueron realizados en el Parque Bicentenario, los perfiles 1 y 2 con una distancia entre 1.0 y 2.0 metros de extensión y una distancia de toma de datos de cada 10 metros. Estos perfiles perpendiculares al fallamiento inferido por Bosse et al, 1978 se hicieron para caracterizar el tipo de comportamiento en estas zonas y evaluar un comportamiento similar en el área de estudio.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

Los resultados de la aplicación del método de campo magnético en los perfiles 1 y 2 registraron una cantidad de ruido considerable que fue eliminada durante el procesamiento; esto por su cercanía al área urbana.

Sin embargo, lograron identificar cambios en el campo magnético que son relacionados con la zona de falla inferida que en la Figura 2, se representa con una línea punteada negra.

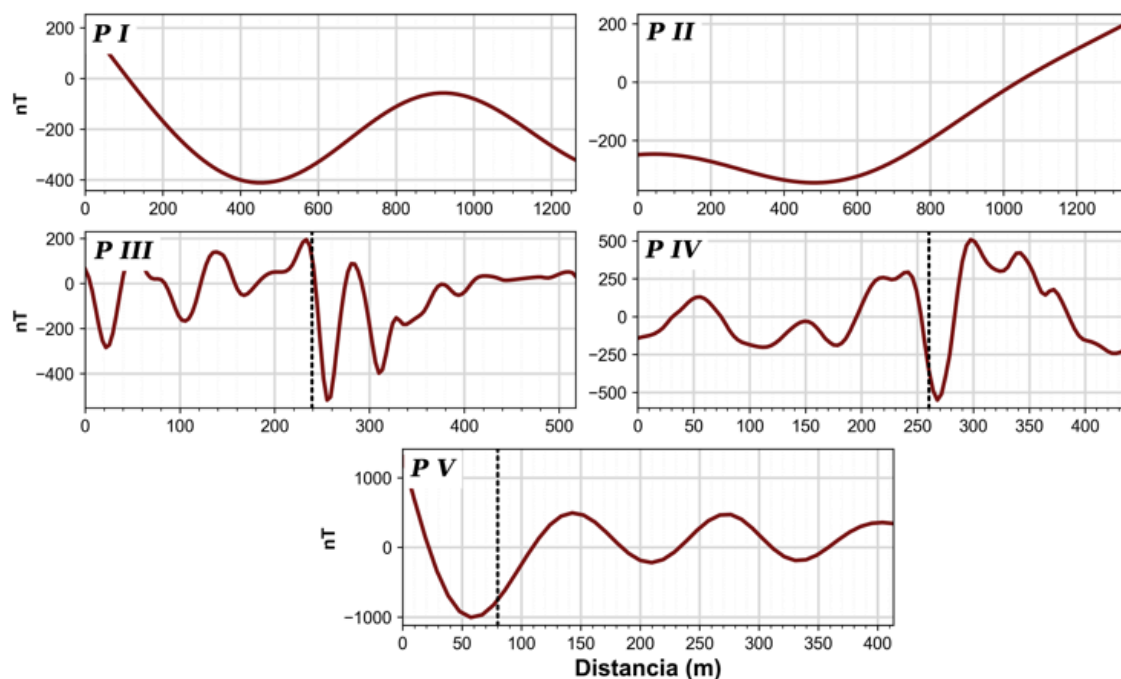


Figura 2. Perfiles adquiridos con el método magnético.

Este tipo de inflexión en la curva de respuesta del campo magnético se relaciona con la presencia de lineamientos estructurales. Por otro lado, los datos de VLF, a partir del componente en fase, fueron procesados con el filtro de Fraser (Figura 3). Al actuar sobre materiales conductores, el filtro de Fraser produce valores máximos útiles para detectar discontinuidades como zonas de fracturas.

La aplicación del filtro de Fraser al componente en fase asoció anomalías conductivas. Estas anomalías se encuentran cerca o incluso sobre la ubicación de la falla inferida; cada uno de los cuerpos conductores asociados presentan una orientación similar a las anomalías magnéticas observadas en la zona de estudio.

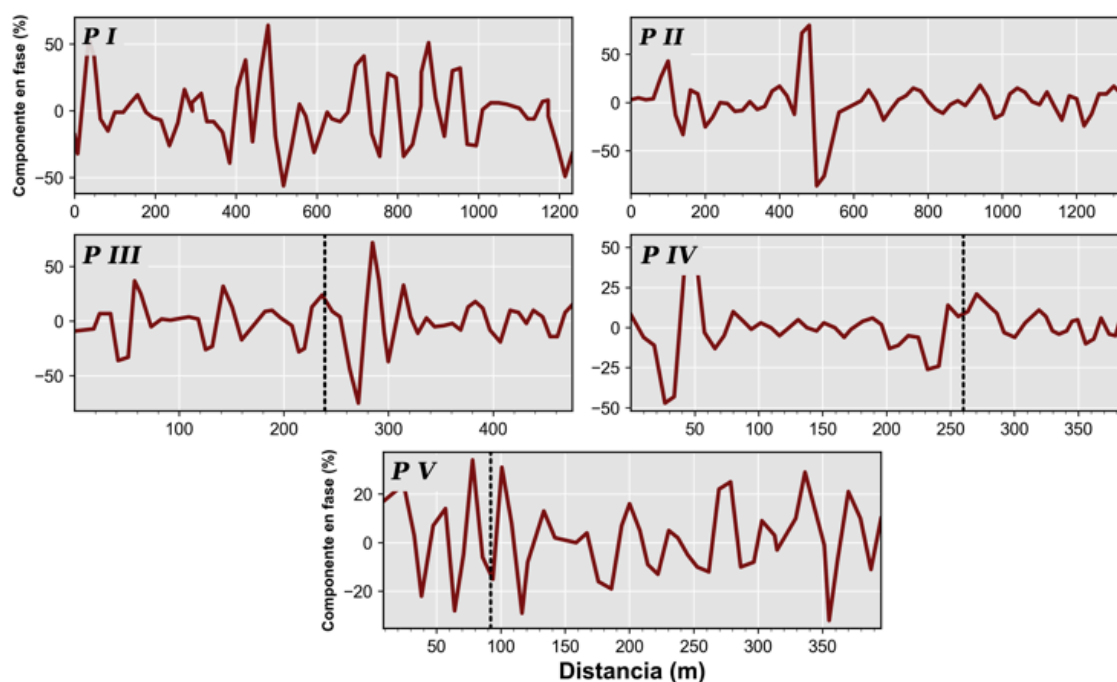


Figura 3. Filtro de Fraser.

Finalmente, los resultados de la aplicación de los métodos magnéticos y VLF tienen una correlación con la zona de inferencia de falla delimitadas, tanto en los cambios del campo magnético como en las curvas de VLF con el filtro de Fraser.

Los resultados obtenidos a partir de los métodos anteriores indicaron la ubicación de las anomalías, que fueron exploradas con el método de tomografía eléctrica. El método de resistividad permitió obtener un análisis claro del marco estructural de la zona, con el principal objetivo de observar características propias de un sistema

de fallas. Dentro de los resultados obtenidos se obtuvo anomalías asociadas a fuertes cambios laterales de resistividad que se extiendan en profundidad.

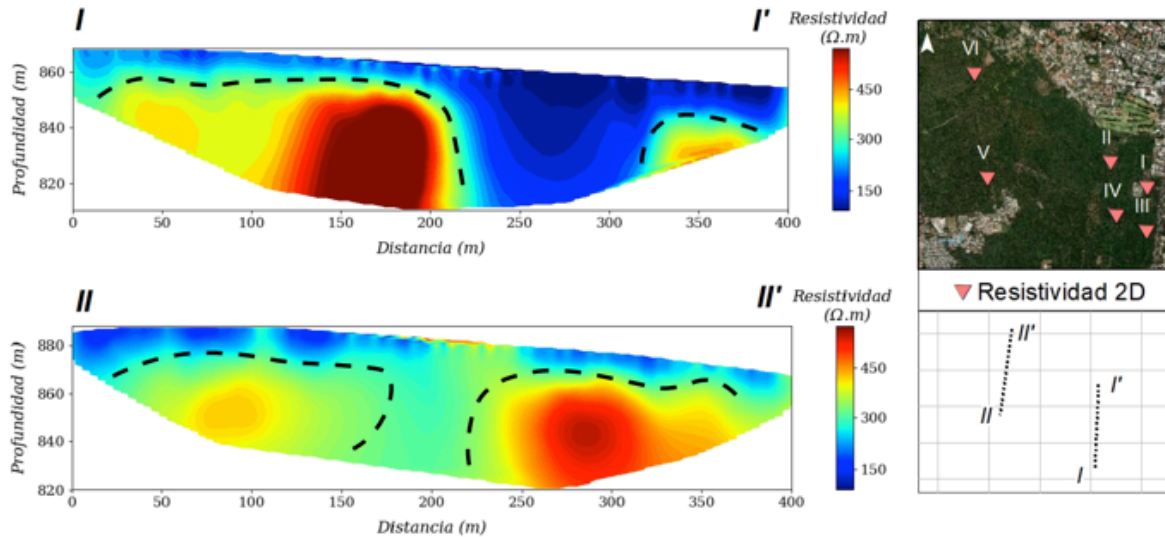


Figura 4. Modelos de resistividad de tomografías TI y TII

Ambos modelos observados en la figura anterior, presentan variaciones de resistividad caracterizados por una distribución decreciente.

Este comportamiento ha sido asociado a procesos de deformación propio de fallas principales. Las tomografías TI y TII colineales y, se encuentran alineadas al segmento de falla ubicado al sureste del área de estudio.

El comportamiento similar entre estas tomografías podría establecer el alcance del posible sistema de fallas, por lo que, las anomalías observadas podrían deberse a una extensión del tramo inferido.

La correspondencia consistente de las fallas mapeadas con las anomalías observadas, representa la evidencia principal de la posible presencia de un sistema de fallas dentro de la zona de estudio.

Los resultados de los análisis establecieron que las anomalías presentan una dirección preferencial de NO-SE, que es congruente con los rumbos generales de las estructurales geológicas en las zonas aledañas.

Referencias bibliográficas

- Baxter, S. (1984). Léxico estratigráfico de El Salvador. Superintendencia de Energía, Comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa.
- Bosse, H., Lorenz, W., Merino, A., Mihm, A., Rode, K., Schmidt-Thomé, M., . . . Weber, H. (1978). Geological map of El Salvador Republic: Hannover germany. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, D-3 scale, 1(100,000)
- Caine, J. S., Evans, J. P., & Forster, C. B. (1996). Fault Zone Architecture and Permeability Structure. *Geology*, 24(11), 1025–1028.
- Diaferia, I., Barchi, M., Loddo, M., Schiavone, D., & Siniscalchi, A. (2006). Detailed Imaging of Tectonic Structures by multiscale Earth Resistivity Tomographies: The Colfiorito normal Faults (Central Italy). *Geophysical Research Letters*, 33(9).
- Ferrés, D. (2014). Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador.
- Günther, T., & Rücker, C. (2013). Boundless Electrical Resistivity Tomography (BERT)
- Fraser, D. (1969). Contouring of VLF-EM Data. *Geophysics*, 34(6), 958–967.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geofísica

Ponencia 17

Estudios geofísicos de reconocimiento en la zona del
volcán de San Salvador.

Pedro Santos. LaGeo, S.A. de C.V.



Estudios geofísicos de reconocimiento en la zona del volcán de San Salvador.

Pedro Santos

LaGeo S.A. de C.V.

Resumen

Para el aprovechamiento de un recurso geotérmico de alta entalpía con fines de generación de electricidad es necesario realizar un proceso de reconocimiento, prefactibilidad, factibilidad, desarrollo y explotación. A medida que se avanza en el conocimiento del área se reduce la extensión del área de estudio.

Por ejemplo, en la fase de reconocimiento se evalúan áreas de 500-1000 km², incluyendo la caracterización geológica, vulcanología y geoquímica con el objetivo de definir las perspectivas de existencia de un recurso geotermal e identificar las áreas de mayor interés. Una vez definida el área de mayor interés, se hace estudio de detalle, en la fase de prefactibilidad sobre un área entre los 10-50 km², con estudios de geología, geoquímica, geofísica y perforación exploratoria con pozos someros de gradiente; en esta etapa el objetivo es reconstruir un modelo del recurso con la integración de datos geo-científicos y ubicar pozos de exploración profunda.

Finalmente, durante la fase de factibilidad se evalúan área de 10-20 km² con la caracterización profunda del reservorio a través de la exploración de pozos profundos, pruebas de pozo y estudios de reservorio con el fin de confirmar la existencia del recurso, definir las características y los aspectos técnicos- económicos de su explotación.

En el área del Complejo Volcánico de San Salvador-CVSS, se realizaron estudios de reconocimiento geofísico a través de los métodos de gravimetría y el Método Electromagnético en el Dominio del Tiempo, conocido por sus siglas en inglés como "*TDEM*".

El método gravimétrico permite estudiar las variaciones del campo gravitatorio en la tierra, generada por las diferencias de densidad de las rocas subsuperficiales; su principio se base en un sistema de masa-resorte, la elongación del resorte

indica la presencia de cuerpos de alta densidad en el subsuelo y la contracción se correlaciona con cuerpos de baja densidad, generando finalmente anomalías positivas y negativas de los valores de densidad.

En cuanto a la adquisición de datos gravimétricos en el CVSS, se cubrió un área de 225 Km² con un total de 223 estaciones, cuyas coordenadas y elevación del terreno son registradas con un sistema diferencial de alta precisión GPS, en una red regular como se muestra en la Figura 1.

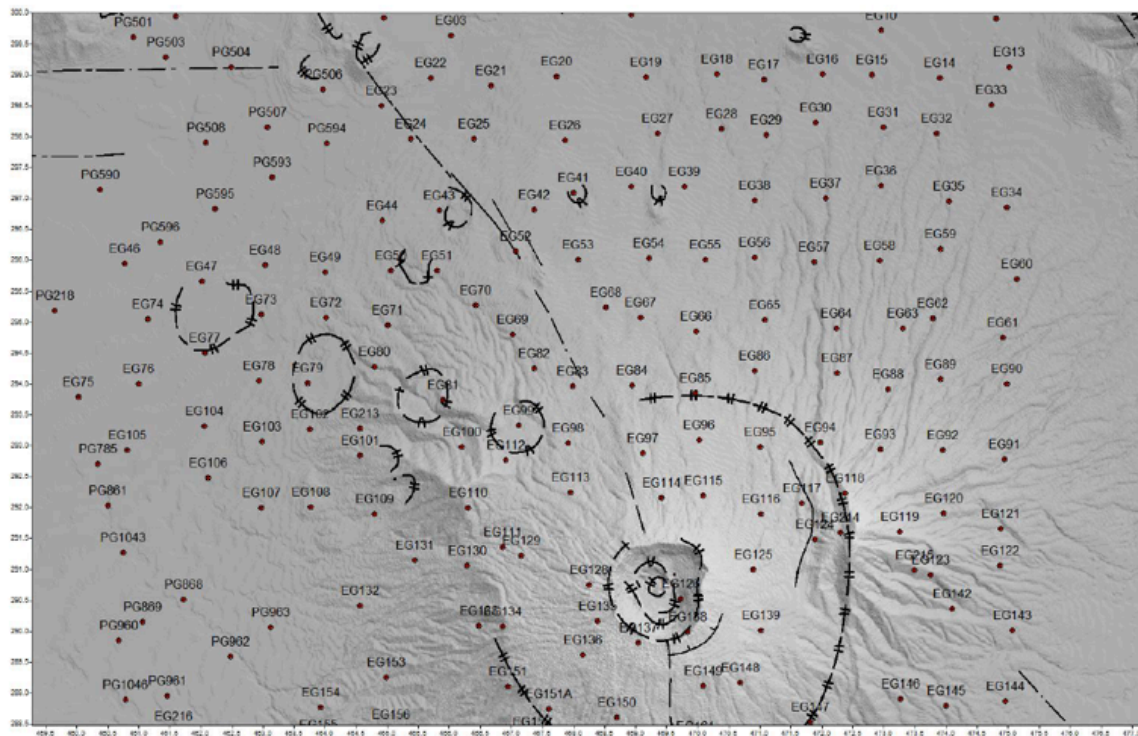


Figura 1. Mapa de distribución de estaciones gravimétricas en el Complejo Volcánico de San Salvador.

La calidad de los datos obtenidos gravimétricos fue muy buena, y el procesamiento de los mismos, mediante el uso del programa WingLink, permitió generar mapas de anomalía gravimétrica como: Bouguer completa, Residual de Bouguer, Filtro paso alto, Continuación hacia arriba y, Primera derivada horizontal, los cuales fueron correlacionados con los sistemas de fallas locales y regionales.

El mapa de anomalía de Bouguer completa está influenciado por la respuesta de estructuras y cuerpos regionales o locales, específicamente en el área del CVSS, los isocontornos pueden estar relacionados a estructuras aleadas con el graben central.

Sin embargo, es posible identificar estructuras locales en dirección NO-SE y ENE-OSO representadas en línea punteada blanca en la Figura 2.

Adicionalmente, a los lineamientos estructurales el Mapa de anomalía de Bouguer permite resaltar la presencia de tres áreas de baja densidad, dos de ellas asociadas al área del Boquerón y Picacho.

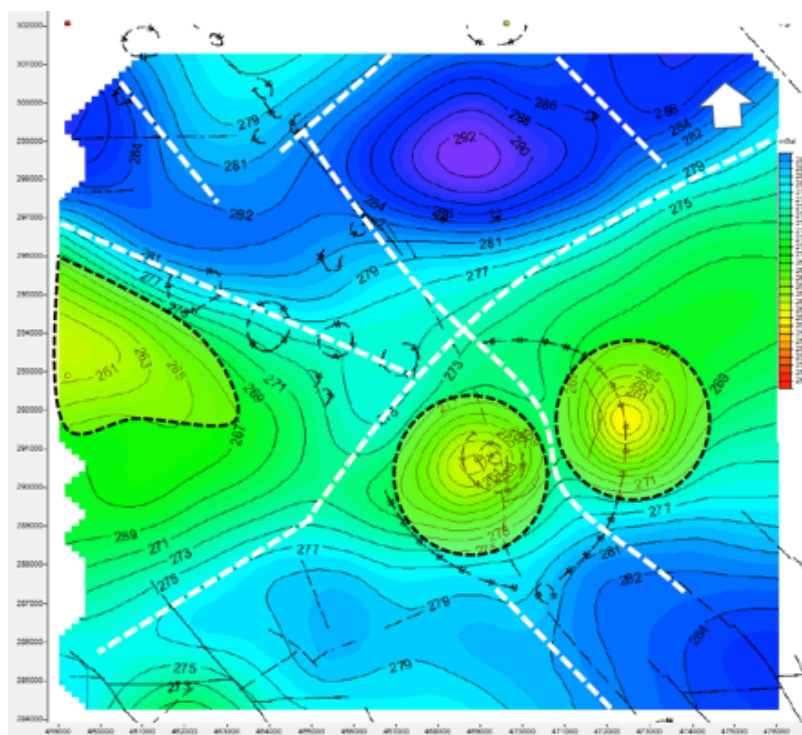


Figura 2. Mapa de Anomalía de Bouguer Completa a densidad de 2.3 gr/cm^3 .

Una de las particularidades del método gravimétrico y su procesamiento, es que a través de filtrados y algoritmos se puede resaltar la presencia de estructuras locales, suavizando la respuesta de los cuerpos profundos (filtro de paso alto).

Por otro lado, el mapa de análisis de continuación hacia arriba permite resaltar la presencia de los cuerpos menos densos hacia la zona de Chalmico, Boquerón y Picacho (Figura 3).

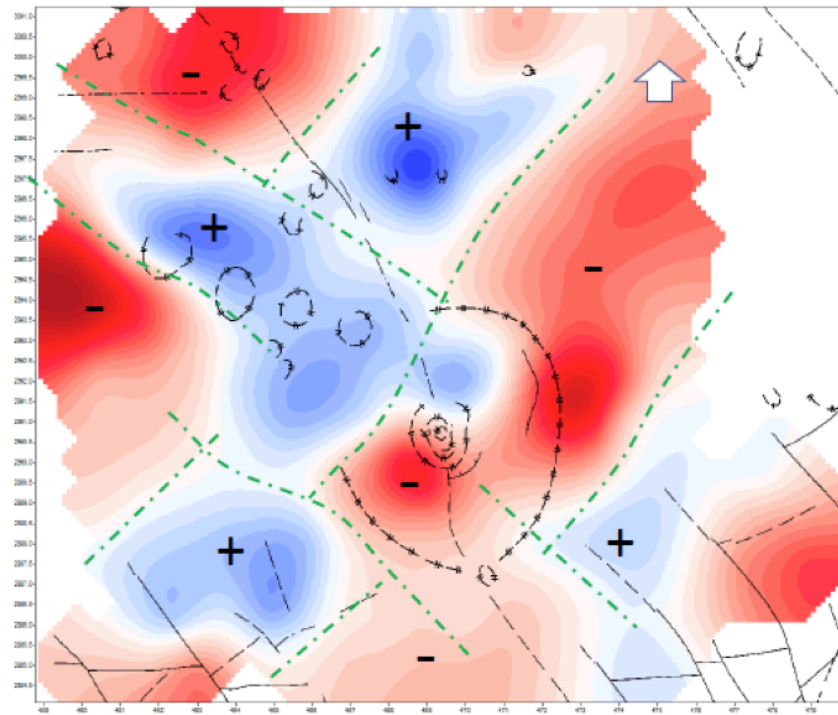


Figura 3. Mapa de continuación hacia arriba de residual de Bouguer a 500 m de elevación.

La interpretación de las anomalías gravimétricas positivas en el área de estudio, sin tener el contexto vulcanológico, pueden estar relacionadas con el comportamiento típico de un graben en donde: las anomalías negativas, pueden estar relacionadas con zonas deprimidas o hundidas; y las anomalías gravimétricas positivas, podrían ser interpretadas como zonas de levantamiento.

Por otro lado, los resultados de la primera deriva horizontal de Bouguer completa a densidad de 2.3 gr/cm^3 , en el sector del volcán San Salvador, identifican una anomalía en dirección NE-SE, que separa las zonas de valores mínimos de Picacho y Boquerón (Figura 4).

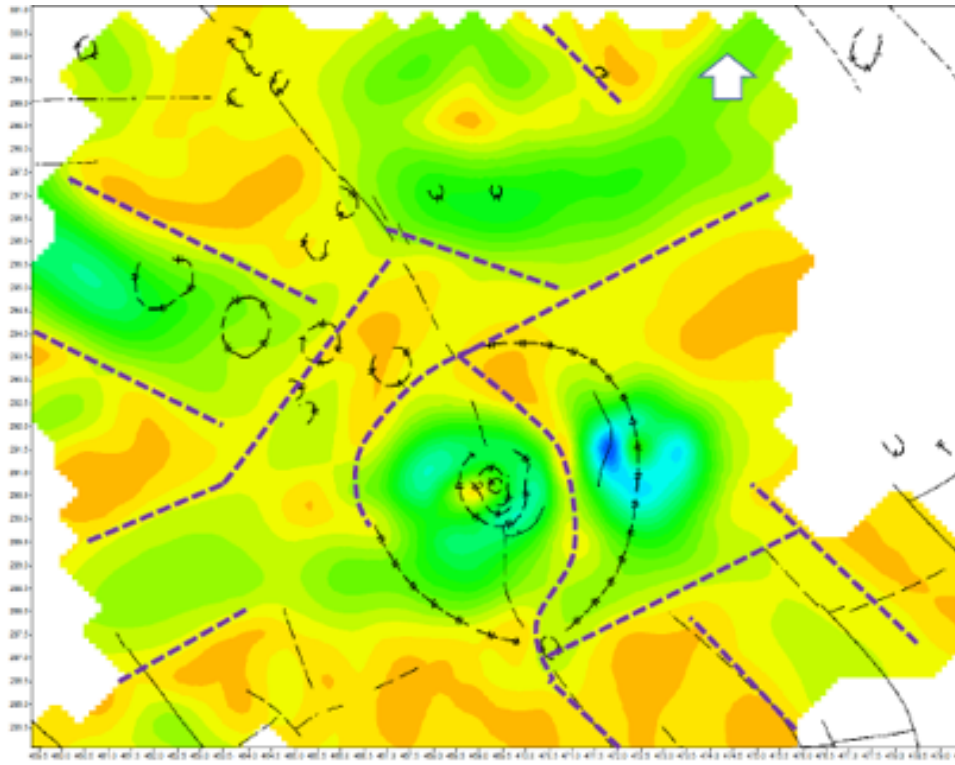


Figura 4. Mapa de primera derivada horizontal de la anomalía de Bouguer completa a 2.3

El análisis cuantitativo, lamentablemente, no logró realizarse para proponer un modelo consistente, debido a no contar con datos de pozo o un estudio base de MT. Sin embargo, de manera cualitativa, es posible identificar dos cuerpos de baja densidad en el sector de Picacho y Boquerón.

La línea roja en el perfil representa el promedio de los datos de gravedad y, en la línea verde, se proyecta los puntos de inflexión relacionados con discontinuidades posibles fracturas/fallas y, los mínimos valores de gravedad relacionados con cuerpos de menor densidad (Figura 5).

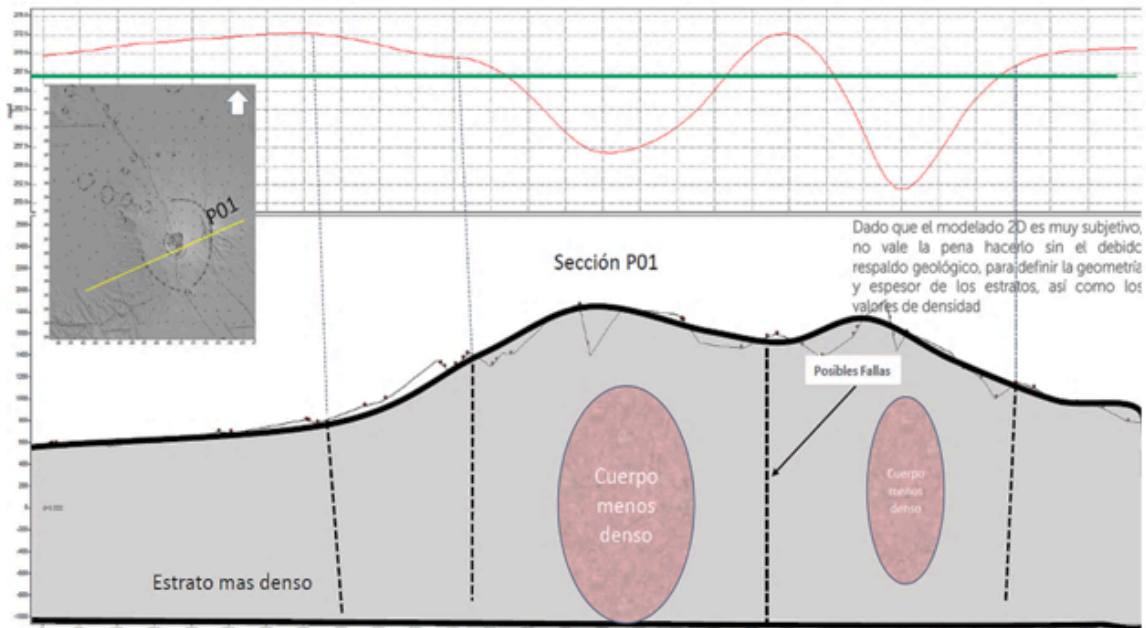


Figura 5. Modelo 2D de anomalía residual de Bouguer a 2.3 gr/cm^3 .

En geotermia, la interpretación de los modelos conceptuales se integra con modelos resistivos generados a partir del método de magnetotelúrica e información de perforaciones.

Un modelo gravimétrico, calibrado con datos de pozo, permite validar la profundidad de los estratos. Adicionalmente, es útil para proponer nuevos sitios de perforación, así como, zonas de expansión de un sistema en producción.

Una correlación de los cuerpos de baja densidad se identifica en el perfil P02 (Figura 6), en dirección NW-SE registra puntos de inflexión relacionados con posibles estructuras o fallas y valores mínimos de gravedad con el cuerpo menos denso; estos resultados permiten interpretar mejor el cierre de la geometría de la falla de caldera del volcán San Salvador.

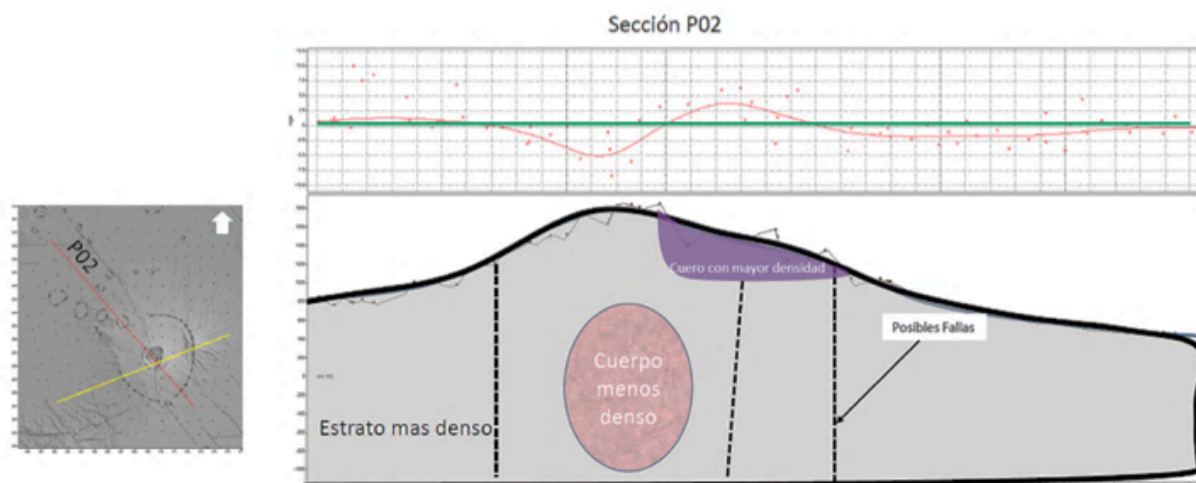


Figura 6. Modelo 2D de anomalía residual de Bouguer a 2.3 gr/cm^3

En este estudio geofísico del CVSS se incluyó la implementación de la técnica del método electromagnético en el dominio de tiempo conocido por sus siglas en inglés como TDEM. Se trata de un método de fuente controlada (activo), que utiliza la difusión de un campo electromagnético transitorio y, permite la determinación de la resistividad eléctrica en el subsuelo desde pocos metros hasta profundidades de 1000 metros.

En el volcán de San Salvador se utilizó un arreglo de 100×100 llegando una profundidad de 300 metros (Figura 7).

Los datos que registraron un alto ruido electromagnético se encuentran hacia el sector SSE dificultando la interpretación, sin embargo, esta incidencia es menor utilizando el método de TDEM que la técnica de magnetotelúrica.

Generalmente, en la exploración geotérmica se utilizan las dos técnicas teniendo en cuenta la profundidad de alcance, dado que el TDEM alcanza profundidades de 500 metros (usando un arreglo de $200 \times 200 \text{ m}$) y, el método electromagnético (MT) hasta 5 kilómetros (con 12 horas continuas de medición).



Figura 7. Ubicación de TDEM Y MT de la zona del Volcán de San Salvador.

Los resultados de TDEM a diferentes profundidades 100, 150, 200 y 300 permiten identificar diferentes zonas resistivas (Figura 8):

- **Profundidad 100 m:** respuesta resistiva en el cráter central, Boquerón, Picacho asociadas a litologías de rocas ígneas formadas a partir de flujos de lava que tienen valores de resistivas entre 300-10000 ($\Omega\text{m}\cdot\text{m}$).
- **Profundidad 150 m:** respuesta de áreas resistivas asociadas a lavas y marcaciones laterales de resistividad asociadas a posibles estructuras en dirección NW-SW y NO-SE.
- **Profundidad 200 m:** respuesta conductiva con valores de resistividades típicas de arcillas y tobas volcánicas. Los contrastes resistivos laterales, son asociados a la posible presencia de fallas locales.
- **Profundidad 300 m:** respuestas conductivas y resistivas. Resistivas en el área del volcán Boquerón, y conductivas en el sector del cerro Picacho que puede estar relacionado con un mayor grado de alteración de las rocas.

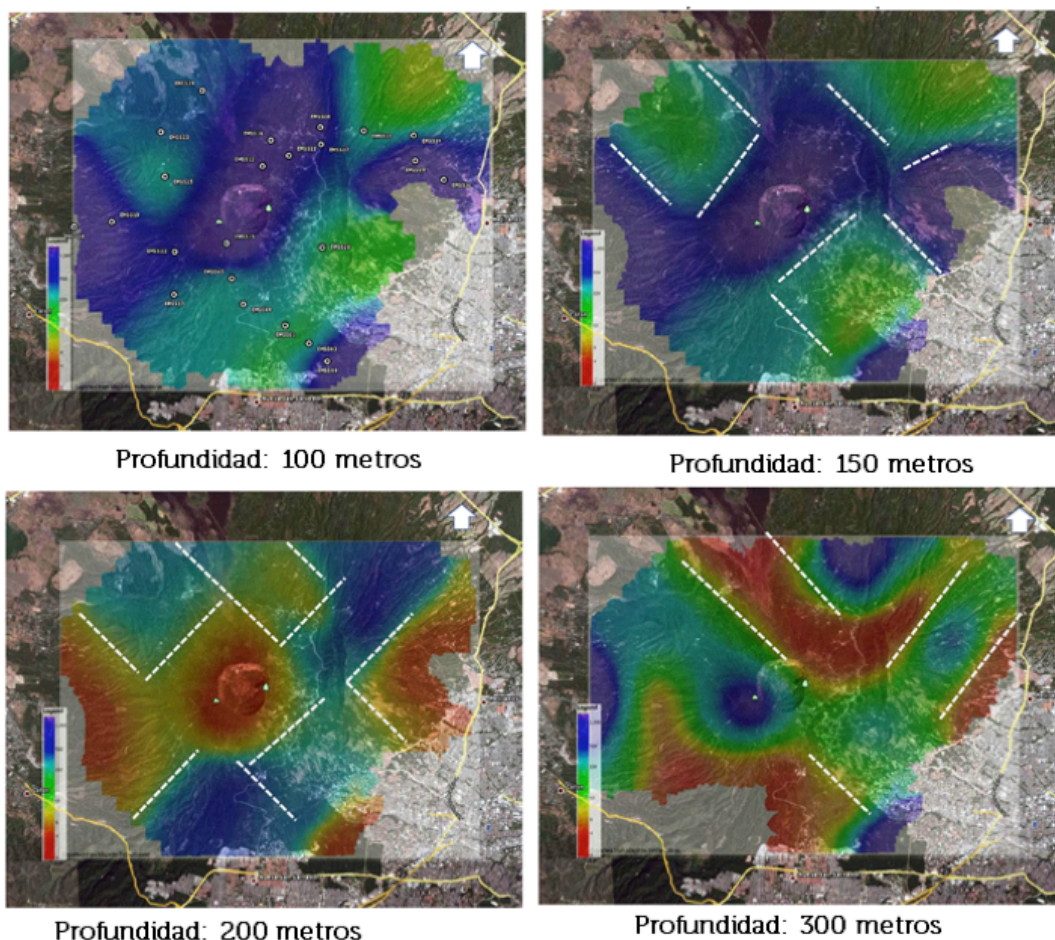


Figura 8. Mapas de resistividad (con método TDEM), a diferentes profundidades.

Las conclusiones de este estudio geofísico realizado en el Complejo Volcánico de San Salvador, se presentan a continuación:

- El resultado del análisis de los diferentes mapas de anomalías gravimétricas sugiere posibles estructuras locales en dirección NO-SE y ENE-OSO, algunas de ellas corresponden con fallas conocidas.
- Se resalta la presencia de tres áreas de baja densidad, dos de ellas asociadas al área del Boquerón y Picacho, observando en todos los mapas analizados.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

- Pese a no realizar el análisis cuantitativo, mediante perfiles 2D, por no contar con información geocientíficas que soporte los modelos, los perfiles mostrados sugieren la presencia de estructuras o fallas, así como, la evidencia de dos cuerpos de baja densidad, posiblemente asociados a la garganta del volcán relleno con material menos denso.
- Los sondeos TDEM realizados muestran un estrato altamente resistivo asociado a lavas, con un espesor entre 150-200 m, subyacente se encuentra un estrato conductivo asociado a arcilla o tobas volcánicas.
- Las variaciones laterales de resistividad evidencian rasgos estructurales consistentes con los observados por el estudio de gravedad.

Capítulo II.

Contexto geocientífico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS).

Geofísica

Ponencia 18

Identificación de límites estructurales asociados con anomalías de potencial espontáneo y flujo de CO₂ en el volcán de San Salvador.

José Efraín Benítez
Universidad de EL Salvador-sede occidente



Identificación de límites estructurales asociados con anomalías de potencial espontáneo y flujo de CO₂ en el volcán de San Salvador, El Salvador.

José Efraín Benítez

Resumen

El área metropolitana de El Salvador- San Salvador concentra la actividad política y económica de la República con una densidad poblacional de aproximadamente 316.000 habitantes distribuidos en cuatro ciudades principales y más de 1'775.000 habitantes en Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), en 2015.

Esta densidad poblacional es la segunda más grande de Centroamérica y la sexta en toda la región de América Central y el Caribe y, alberga el área del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS), constituido por los remantes del volcán de San Salvador, el volcán Boquerón y una serie de volcanes monogenéticos alineados en las zonas de fracturamiento principales del CVSS.

El complejo volcánico CVSS comprende un área aproximada de 110 km² y es reconocido por tres geoformas prominentes, como lo son los remanentes del volcán San Salvador: cerro El Picacho (1960 m.s.n.m), cerro el Jabalí (1397 m.s.n.m) y el edificio volcánico del Boquerón (1839 m.s.n.m).

La historia eruptiva de este CVSS hace referencia a los últimos 70.000 años a través de su cráter central y fisuras en sus flancos, siendo considerado un volcán activo donde se encuentran complejos hoteleros y turísticos a menos de 1. 5 km del cráter central volcán Boquerón y a 8 km en línea recta de la ciudad de San Salvador, que requiere estudios geocientíficos detallados y continuos, que permitan un mejor entendimiento del comportamiento del CVSS.

La actividad sísmica en el área del CVSS se debe a la presencia de sistemas de fracturamiento en direcciones NW-SE y NE-SW, relacionadas al sistema volcánico de la región.

En cuanto a las erupciones más recientes se registra la actividad de 7 junio de 1917 a las 18:55 h, la cual dio inicio con un sismo de VI en la escala de Mercalli, seguido de un sismo de igual intensidad a las 20:11 h, que detonó la perturbación del sistema volcánico generando una espesa columna de humo que se levantó verticalmente, acompañada con el lanzamiento material incandescente hacia el noroccidente del volcán San Salvador, donde se generó una fractura en dirección NNW-SSE, la cual produjo una erupción efusiva de lavas tipos AA en dirección Norte.

En este lugar se identificaron entre siete (7) y doce (12) bocas eruptivas entre los 1350 y 1410 m.s.n.m, y se registró la actividad en los conos Los Chintos alineados a la misma zona de fractura entre 700 y 800 m.s.n.m.

La anterior actividad se define como estromboliana; en donde las coladas de lava fluyeron hasta obstruir la vía férrea de Ciudad Arce a Quezaltepeque durante la noche del siete (7) de junio, desviándose posteriormente hacia el oeste hasta llegar a 3 km de la laguna de Chanmico, donde se detuvo el día once (11) del mismo mes, la superficie de la colada alcanzó una distancia de 12 kilómetros.

Por otro lado, en el cráter del boquerón existía un lago que entró en ebullición para el nueve (9) de junio, el cual se evaporó veinte días después apareciendo el cráter un pequeño cono de escorias conocido como el boqueroncito, cuyo origen se debe a la actividad estromboliana que expulsó escorias, lapilli y cenizas.

A continuación, se mencionan algunos de los eventos históricos en el CVSS:

- 1575. Se registra actividad fumarólica.
- 03/1/1658. explosión de gases y cenizas con emisión de lavas que cubre alrededor de 20 km², destruye el pueblo de Nejapa. Se menciona actividad sísmica precursora a la erupción.
- 1671. Erupción de ceniza.
- 1917. Efusión de lava tipo AA en el flanco NW a través de una fractura, formándose en el fondo del cráter principal un conito circular de escorias llamado Boqueroncito, alcanzó una altura de 30 metros, se reportaron 48 personas fallecidas y perdidas por USD\$ 5.3 millones de dólares.

Teniendo en cuenta la importancia de mejorar el entendimiento de los aspectos geocientíficos del CVSS y, las implicaciones de una determinada actividad sísmica y volcánica, en el área de influencia del Área Metropolitana de San Salvador, este trabajo busca aportar al conocimiento de la respuesta del potencial espontáneo del terreno en un perfil en dirección N-S, atravesando el cráter central del volcán Boquerón, la cual puede ser correlacionada con la circulación de fluidos en el subsuelo.

La adquisición de datos de potencial espontáneo y CO_2 se realizó durante los meses de noviembre y diciembre de 2015, en un período de 30 días, siendo el objetivo principal identificar zonas de circulación de fluidos tanto hidrotermales H_2O como magmáticos CO_2 y, zonas de mayor permeabilidad.

En total, se realizaron tres perfiles adquiridos e interconectados con medidas cada 20 metros de potencial espontáneo y CO_2 , esta configuración tuvo que hacerse debido a que no fue posible seguir la línea de fractura en dirección NW-SE, por limitaciones con la seguridad de la zona.

Los resultados de este estudio permitieron identificar cambios fuertes en los valores de potencial espontáneo en la zona norte del cráter (más de 300 MV, en 40 metros), los cuales se relacionan con la infiltración preferencial de agua lluvia en un límite estructural (tipo falla), que cruza la parte superior del cráter. Mientras que, en la zona sureste del cráter se identificó una zona con valores más altos de flujo de CO_2 con máximos de 225 ($\text{gr}/\text{m}^2\text{-día}$) y hacia los flancos se detecta una zona de ascenso preferencias de fluidos.

En conclusión, las principales anomalías en la parte norte del volcán son de origen hidrometeorológico con un mínimo auto potencial de hasta – 500 MV relacionado con la infiltración preferencial a lo largo de un sistema de fallas (visible dentro del cráter), la desgasificación de CO_2 registrada en 2015, indicó un pico máximo de 100 $\text{g}/\text{m}^2\text{ día}$, alrededor de la zona conocida como la Olla (fumarolas “El infiernillo”). La anomalía registrada en el borde del cráter se relaciona con un sistema hidrotermal cuya energía térmica, posiblemente, proviene del sistema de alimentación magmática del flujo de lava de 1917.

Capítulo III.

Amenazas Geológicas

Flujos de escombros

Ponencia 19

Investigaciones para la caracterización de flujos de escombros en Volcán de San Salvador.

Ingrid Alfaro.
Oficina de Planificación del Área Metropolitana
de San Salvador (OPAMSS).



Investigaciones para la caracterización de flujos de escombros en Volcán de San Salvador

Ingrid Alfaro.

Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador (OPAMSS).

Resumen

La mayoría de los eventos catalogados como inundación o desbordamiento en quebradas por grandes volúmenes de agua, realmente son eventos de flujos de escombros o lahares y suelen confundirse con eventos típicos de flujo de agua debido al comportamiento que se asemeja a las condiciones hidráulicas de un flujo newtoniano, es decir, que se conduce bajo las leyes físicas de los fluidos.

Sin embargo, esta mezcla de agua con lodo, sedimentos y rocas son indicaciones de flujo de escombros. Dentro de los antecedentes más representativos de este tipo de fenómenos que han afectado el Área Metropolitana de San Salvador, se resaltan los ocurridos en la zona de Arenal de Mejicanos:

- **Flujo de escombros 1934:** volumen estimado de 2,125.000 m³, no causó daños mayores debido a una baja densidad poblacional en esa época.
- **Flujo de escombros 1982:** volumen estimado de 425.000 m³ (Kermun y Ledru, 1996), soterró muchas viviendas y causó la muerte de casi 500 personas, además hubo cambios en la morfología del canal principal (Major, 2001).
- **Flujo de escombros 2008:** no causó afectaciones a la población debido a un volumen menor que los registrados en años anteriores.

En otras áreas como la Quebrada Buenos Aires, en el año 2010 se presentó un flujo de escombros en la ciudad de Santa Tecla que había sido catalogado, preliminarmente, como una inundación. Sin embargo, las inspecciones en campo permitieron evidenciar arrastre de material de sedimentos, lodo y rocas que se relaciona mejor con un fenómeno de flujo de escombros.

Así mismo, en el año 2015 en la Quebrada las Lajas, colonia Escalón se registraron dos flujos: el primero, en el mes de agosto causando erosión y movimiento de árboles y bloques sin impactos mayores a la población. Posteriormente, el 3 de noviembre ocurre otro flujo de escombros que ocasiona el cierre de una calle principal.

Por otro lado, uno de los eventos más recientes y lamentables por los impactos de un evento de flujos de escombros ocurrió en el mes de octubre 2020, proveniente de las laderas del cerro el Picacho encausado hacia la quebrada el Terraplén que ocasionó la pérdida de nueve personas y una desaparecida, con una afectación total de 90 viviendas.

Estos antecedentes son fundamentales para comprender el comportamiento y alcance de un flujo de escombros y los impactos hacia la población.

Algunas de las investigaciones realizadas en esta temática se potencializaron desde el año 2014 en Oficina de Planificación del Área Metropolitana de San Salvador, iniciando con la caracterización de flujos de escombros y programas de manejo, en dos años siguientes se lograron realizar presentaciones de planes de acción a entidades como JICA, MOP, DAGGER y MARN; y en 2017, se hace la campaña geotécnica y levantamiento topográfico, incluyendo simulaciones en el programa LAHARZ.

En cuanto a la vinculación con la academia se inició en 2018-2019 con la dirección de tesis de grado en modelado de quebradas en el sector Norte del AMSS y

simulación de flujos con el software HECRAS y, finalmente, en años recientes se han fortalecido el conocimiento en simulaciones.

Con la anterior información, se quiere contribuir para las medidas de mitigación en sectores ya desarrollados y, prevenir las afectaciones por medio de la planificación y control del territorio.

El estudio de flujos de escombros requiere una caracterización adecuada de la hidrología, hidráulica, modelación 1-2D y debe relacionarse con el monitoreo de las principales quebradas que pueden tener acumulación de material en eventos meteorológicos fuertes que no desarrollan un flujo de escombros en el momento, pero que pueden en años posteriores, convertirse en diques o barreras que pueden ser removidas con flujos recientes aumentando el impacto del flujo de escombros.

Los estudios más relevantes se han realizado en la cuenca de Arenal de Mejicanos, mediante laharZ para volúmenes de flujo de 100 km^3 , 300 km^2 y 500 km^2 . Por otro lado, en Loma Larga y quebrada Terraplén.

Adicionalmente, se han realizado levantamientos topográficos a detalles y análisis granulométricos y modelamiento en el programa DAN 3D. Los productos técnicos elaborados a partir de estos estudios han sido publicaciones en revistas internacionales, manuales internos, y tesis de grado.

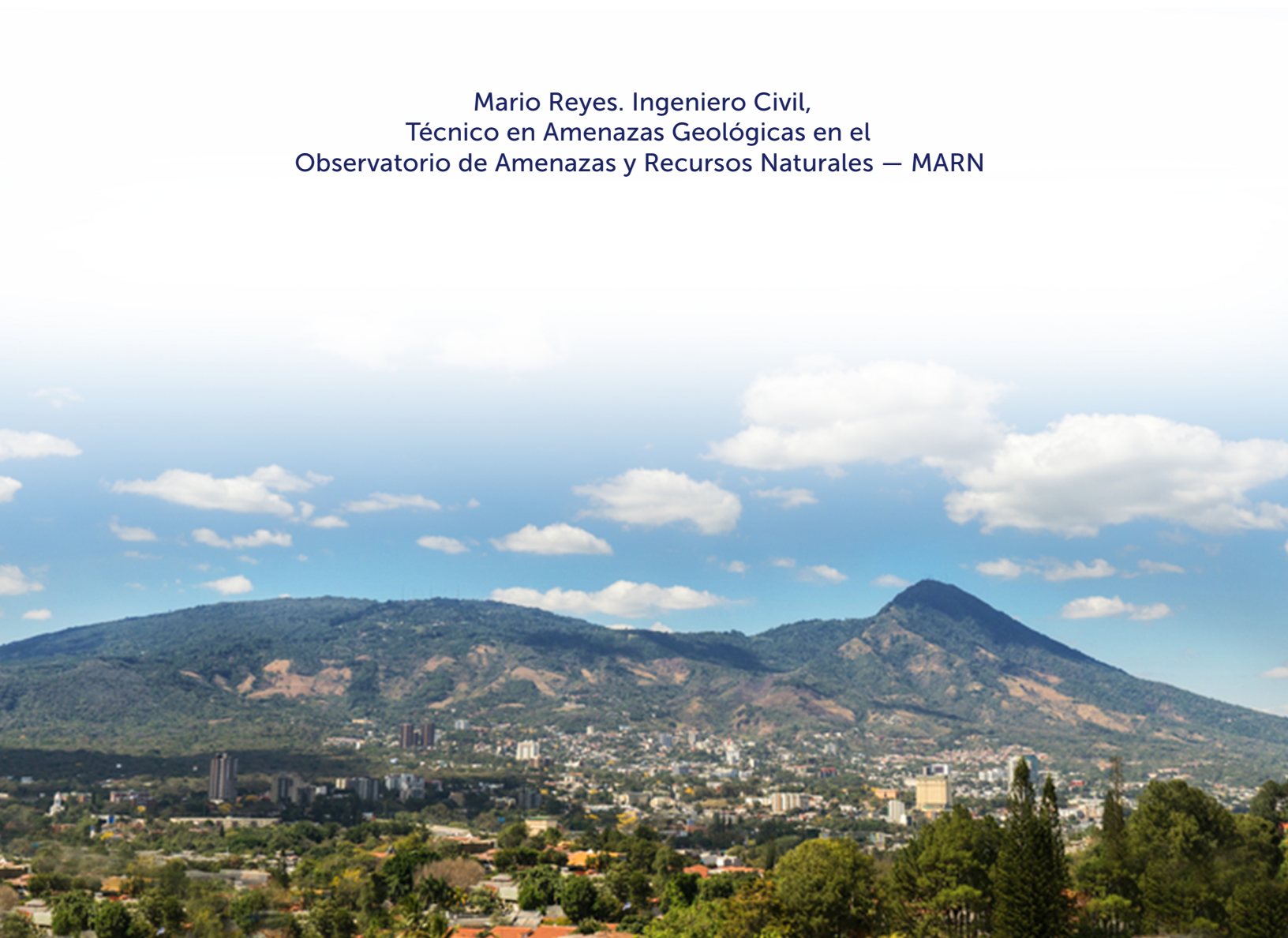
Capítulo III.

Amenazas Geológicas

Ponencia 20

Amenaza por flujos de escombros en el CVSS y modelos para alerta temprana.

Mario Reyes. Ingeniero Civil,
Técnico en Amenazas Geológicas en el
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales — MARN



Amenaza por flujos de escombros en el CVSS y modelos para alerta temprana

Mario Reyes. Ingeniero Civil, Maestro en Ciencias con especialización en Geociencias, Técnico en Amenazas Geológicas en el Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales — MARN.

Resumen

La clasificación de umbrales de lluvia para la ocurrencia de deslizamientos según Guzzetti et al (2007), se divide en modelos físicos y modelos empíricos. Los modelos físicos requieren como insumo información geotécnica e hidrogeológica que, generalmente, no están disponibles para áreas extensas, reduciendo su aplicabilidad. Por el contrario, los modelos empíricos requieren una menor cantidad de información debido a que utiliza relaciones estadísticas que incluyen los valores de lluvia de umbrales que han ocasionado o no deslizamientos. Esta clasificación de umbrales se divide en tres categorías:

1. **Umbrales con mediciones de lluvia para un evento en específico:** esta categoría puede subdividirse en: umbrales intensidad duración (ID), umbrales lluvia acumulada-duración (ED) y, umbrales lluvia acumulada intensidad (E-I).
2. **Umbrales lluvia antecedente:** generalmente, se construyen eligiendo un período de lluvia antecedente específico (p. ej. 4, 7 o 15 días) y, estableciendo una relación entre la ocurrencia de deslizamientos con la cantidad de lluvia antecedente para ese período.
3. **Umbrales que combinan lluvia antecedente con lluvia del evento:** combinan la lluvia del evento con lluvia antecedente y, generalmente, se logra una reducción de las falsas alarmas.
4. **Otros umbrales:** son umbrales que no entran en ninguna de las categorías anteriores, por ejemplo, umbrales que usan datos de descarga, lluvia máxima esperada para un período de retorno específico, entre otros.

Uno de los aspectos importantes en la valoración de estos umbrales es el conocimiento de eventos antecedentes de flujos de escombros.

En el sector del Complejo Volcánico de San Salvador han ocurrido algunos eventos importantes en los últimos 100 años. Uno de ellos, es el evento ocurrido en 1934, en el flanco este de El Picacho, donde el movimiento en masa dejó una cicatriz que es reconocible en fotografías aéreas del año 1949.

El evento meteorológico que se relaciona es un huracán que generó afectaciones por flujos de escombros en otras ciudades, por ejemplo, San Vicente y Metapán. Otro de los eventos más representativos es el ocurrido en septiembre de 1982, en el que un flujo de escombros originado en el Picacho, afectó algunas comunidades en el municipio de Mejicanos, ocasionando la muerte de entre 300 a 500 personas. El volumen estimado de este flujo de escombros es de 200,000 a 300,000 m³.

Finalmente, se tiene el flujo de escombros ocurrido en el municipio de Nejapa en 2020, que afectó las comunidades Angelitos I y II, el cual se originó en el flanco norte de El Picacho. De acuerdo a la información de la Dirección General de Protección Civil, se tienen once (11) personas fallecidas y alrededor de 135 viviendas destruidas. De forma preliminar, se estima que el volumen del flujo de escombros oscila entre 35.000 y 50.000 m³. La tormenta que ocasionó el flujo de escombros de Nejapa tuvo condiciones muy particulares, debido a la corta duración (3 horas) y, un alto valor acumulado (133.6 mm), con una intensidad horaria de 55 mm/ h.

Con el propósito de estimar las condiciones de lluvia que causan deslizamientos en El Salvador, se generaron umbrales basados en la lluvia acumulada y duración de tormentas (ED).

Los datos usados en el análisis incluyeron 366 deslizamientos de los que tiene información parcialmente confirmada y cuentan con el registro del día de ocurrencia; 212 provienen de la base de datos del Fondo de Conservación Vial (FOVIAL), para el período del 12 de octubre al 04 de noviembre de 2019; así como, 48 deslizamientos usados para el modelo de deslizamientos del *Central America Flash Flood Guidance System* (CAFFGS). Para los datos de lluvia, se usaron datos

horarios de 116 estaciones automáticas distribuidas a lo largo de todo el territorio para el período de 2003 a 2019.

Los datos no tienen ningún tipo de corrección. Se hizo una corrección automática de los datos de lluvia, eliminando los datos con intensidades mayores a 100 mm/h. El hecho de no tener datos de lluvia corregidos es una de las limitantes del trabajo.

La metodología usada para el cálculo de los umbrales de lluvia se basó en el algoritmo implementado en la herramienta CTRL-T (*Calculation of Thresholds for Rainfall-induced Landslides Tool*), descrita por Melillo et al (2018).

La herramienta está escrita en el lenguaje de programación R. Reconstruye eventos de lluvia en términos de su lluvia acumulada y duración y determina los eventos que son más probables que sean responsables por la ocurrencia de deslizamientos. El código genera umbrales para diferentes probabilidades de no excedencia, que tienen la forma siguiente:

$$E = (\alpha \pm \Delta\alpha) \cdot D^{(\gamma \pm \Delta\gamma)}$$

E representa la lluvia acumulada, D la duración, los coeficientes γ y $\Delta\gamma$ son el intercepto y la pendiente de la curva potencial y $\Delta\alpha$ y $\Delta\gamma$ son las incertidumbres relativas de los parámetros. Los umbrales se crean como una curva (o una recta en escala logarítmica), que representa el límite inferior de las condiciones de lluvia que causan deslizamientos.

Se generaron umbrales para probabilidades de no excedencia desde el 0.005 % hasta el 50 %. En la Figura 1, se muestran los umbrales para el 1 y 5 % junto con los datos de deslizamientos.

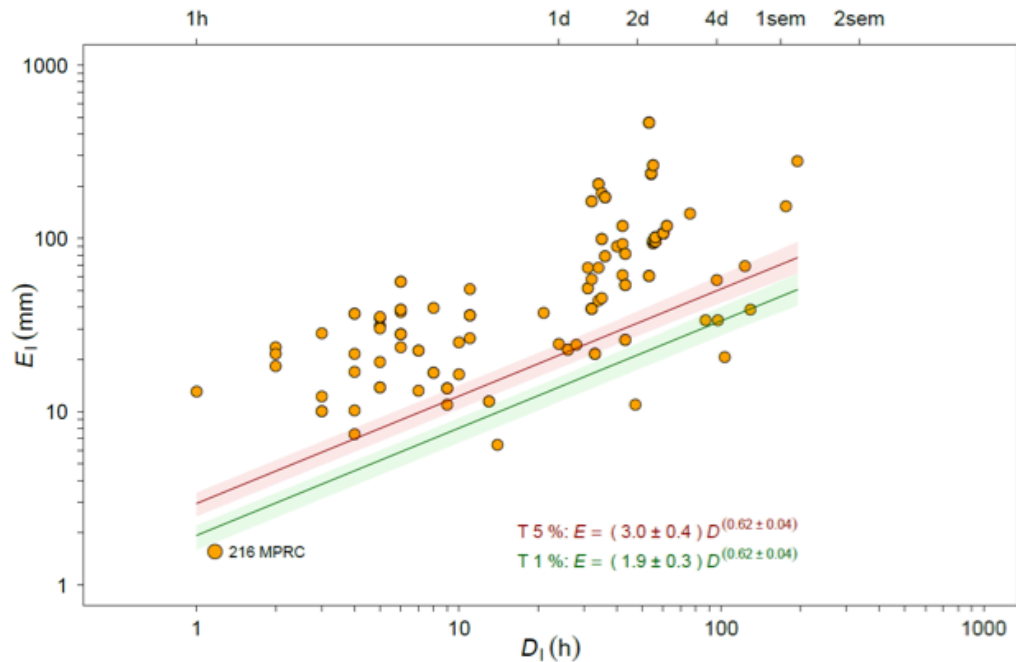


Figura 1. Umbrales de lluvia para la ocurrencia de deslizamientos para todo El Salvador.

Al graficar los flujos de escombros ocurridos en El Picacho con los umbrales generados con deslizamientos ocurridos en todo El Salvador, se observa que las condiciones de lluvia que tienen las tormentas que causan flujos de escombros en El Picacho, son notablemente diferentes de las que causan deslizamientos en otras partes del país (Figura 2).

En general, los umbrales creados usando datos de deslizamientos pequeños en otras zonas tienden a ser conservadores y generar bastantes falsas alarmas. Por lo anterior, se requiere tener umbrales específicos para la zona de El Picacho.

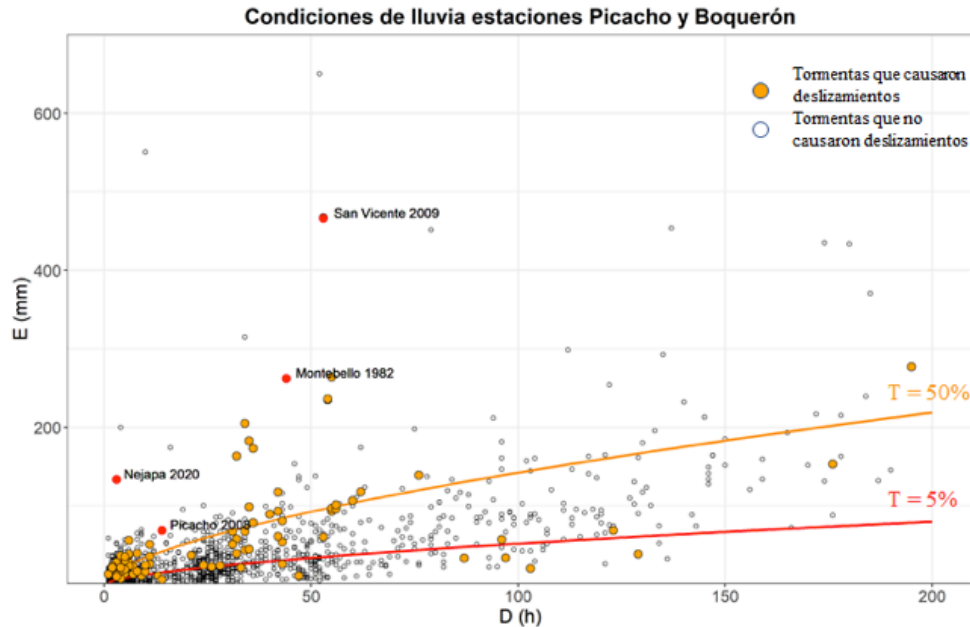


Figura 2. Condiciones de lluvia en estaciones Picacho y Boquerón.

El uso de umbrales que usen la lluvia antecedente combinada con la lluvia del evento puede ayudar a reducir el número de falsas alarmas. Ya que existen unos umbrales de este tipo creados por Cepeda (2009) que, a pesar de haber sido creados con un set limitado de datos de lluvia, pueden probarse para evaluar su puesta en operación dentro de un sistema de alerta temprana.

Referencias bibliográficas

Cepeda, J. (2009) Characterisation and risk management of rainfall-induced landslides. PhD dissertation, University of Oslo.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. et al (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorol. Atmos. Phys. 98, 239–267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>

Melillo, M., Brunetti M.T., Peruccacci S., Gariano S.L., Roccati A., Guzzetti F. (2018) CTRL-T: a tool for the automatic calculation of rainfall thresholds for landslide occurrence. Environmental Modelling & Software 105 230–243, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.03.024>

Capítulo III.

Amenazas Geológicas

Ponencia 21

Escenarios de amenazas volcánicas del CVSS y construcción de mapas de peligro determinísticos.

Dolors Ferres.
Universidad Autónoma de México



Escenarios de amenazas volcánicas del CVSS y construcción de mapas de peligro determinísticos.

Dolors Ferres.

Resumen

La combinación de factores de peligro (volcánico, sísmico, geológico e hidrometeorológico) y de vulnerabilidad (física, económica y social) de la población expuesta en el entorno del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS), hacen que este constituya uno de los centros volcánicos de mayor peligrosidad de El Salvador, Centroamérica (Paniagua, 2002; Sofield, 2004; Ewert y Harpel, 2004; Palma et al., 2009) y el mundo.

El riesgo de pérdidas y daños severos en el AMSS y, en otros centros urbanos y rurales en el entorno del CVSS, por el impacto una futura erupción del volcán Boquerón o un evento eruptivo de flanco, es muy alto. La evaluación de peligros volcánicos para este complejo es de enorme relevancia, ya que una futura erupción, aún de pequeña magnitud, afectaría directa e indirectamente a cientos de miles de personas y supondría un enorme y devastador retroceso en el desarrollo del país. Por tanto, se hace imprescindible disponer de las herramientas técnicas para la emisión de pronósticos a corto y largo plazo, para un correcto funcionamiento del Sistema de Alerta Temprana por erupciones.

En la segunda parte de la investigación doctoral: "Estratigrafía, geología y evaluación de peligros volcánicos del Complejo Volcánico de San Salvador (El Salvador)", desarrollada entre 2006 y 2014, se realizó la evaluación de la peligrosidad volcánica y se construyeron los mapas de amenaza volcánica para diferentes fenómenos volcánicos asociados a la actividad eruptiva explosiva a partir de la simulación con códigos computacionales especializados y con una metodología determinística de diferentes escenarios eruptivos.

Se definieron tres escenarios de peligro para los procesos de caída de ceniza, emisión de proyectiles balísticos, flujos piroclásticos y oleadas piroclásticas en el volcán Boquerón, a partir de la integración de la información histórica, de los datos

geológicos obtenidos en campo y de la simulación por computadora de cada uno de los procesos mencionados.

Cada escenario se caracteriza por una probabilidad estimada de la tasa de ocurrencia (baja, media, alta) de eventos eruptivos de pequeña, intermedia o gran magnitud, identificados en el registro histórico y geológico de erupciones, los cuales están definidos, principalmente, por la distribución espacial de sus productos.

Los mapas de peligro resultantes muestran las posibles zonas de distribución de los productos de una futura erupción, con diferentes grados de afectación, según el escenario considerado.

Estos mapas, elaborados con una metodología determinística, pueden constituir herramientas útiles para las instituciones salvadoreñas de planificación territorial y de protección civil en la consideración de los peligros volcánicos para la gestión de riesgos, la prevención de desastres y la protección de la vida y bienes de la población que vive y trabaja en el área de influencia de este volcán, la cual ha sido estimada en 1.5 millones de personas.

Referencias bibliográficas

- Alatorre Ibargüengoitia M. A., Delgado Granados H., Farraz Montes I. A., 2001. Mapa de peligros por caída de productos balísticos del volcán Popocatepetl. Instituto de Geofísica (UNAM) y CENAPRED (México).
- Alatorre-Ibargüengoitia, M. A., 2003. Física de Projectiles Balísticos Volcánicos y delimitación de zonas de peligro por su impacto. Tesis de Grado. Licenciatura en Física. Universidad, Nacional Autónoma de México, 125 p.
- Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., Delgado-Granados, H., Farraz-Montes, I.A., 2006b. Hazard zoning for ballistic impact during volcanic explosions at Volcán de Fuego de Colima (México). Geological Society of America, Special Paper 402, 195-202.

- Blong, R.J., 1984, Volcanic hazards: A Sourcebook on the Effects of Eruptions. Academic Press, Orlando, Florida, 424 p.
- Delgado Granados, H., Navarro Collado, M., Farraz Montes I. A., Alatorre Ibargüengoitia M. A. 2002. Volcán Concepción: Mapa de Amenaza Volcánica I. Balísticos y Flujos de Lava. II. Flujos piroclásticos y caída de ceniza y III. Lahares y colapsos. Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER), Nicaragua.
- Delgado Granados H., Navarro Collado M., Farraz Montes I. A., Alatorre Ibargüengoitia M. A. 2003.
- Volcán Masaya: Mapa de Amenaza Volcánica I. Projectiles Balísticos, II. Caída de cenizas y III. Lahares y colapsos. Instituto Nacional de Estudios Territoriales (INETER), Nicaragua.
- Escobar, C.D., 2000. Zonificación Preliminar de Peligros del Volcán de San Salvador (El Boquerón). Departamento de Investigaciones Sismológicas. Centro e Investigaciones Geotécnicas. Ministerio de Obras Públicas de El Salvador. Inédito.
- Escobar, C.D., 2003. San Miguel Volcano and its volcanic hazards, El Salvador. Unpublished MS Thesis. Michigan Technological University, USA.
- Escobar, C.D., Ferrés, D., Pullinger, C., Delgado-Granados, H., Farraz, I.A., Alatorre-Ibargüengoitia, M.A., 2004. Mapa de escenarios de amenaza del Volcán de San Miguel o Chaparrastique. Dirección General del Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador.
- Ewert, J.Y., Harpel, C., 2004. In harm's way: A volcano population index for estimating volcanic risk. Geotimes, 4, 14-17.
- Ferrés, D., Escobar, C.D., Pullinger, C., Vallance, J.W., Griswold, J.P., 2004. Mapa de Escenarios de Amenaza del Volcán de Santa Ana. Dirección General del Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador.
- Ferrés, D., Delgado-Granados, H., Gutierrez, R.E., Farraz, I.A., Hernández, E.W., Pullinger, C.R., Escobar, C.D., 2013. Explosive volcanic history and hazard zonation

- maps of Boquerón Volcano (San Salvador volcanic complex, El Salvador), in Rose, W.I., Palma, J.L., Delgado Granados, H., and Varley, N., eds. Understanding Open-Vent Volcanism and Related Hazards. Geological Society of America Special Paper 498, pp. 1-30. DOI: 10.1130/2013.2498 (12)
- Geophysical Mass Flow Group, 2007. Titan 2D User Guide. University at Buffalo, NY, USA.
- Hurst, A.W., 1994. Ashfall, a computer program for estimating Volcanic Ash Fallout. Report and users guide. Institute of Geological and Nuclear Sciences, Wellington, New Zealand.
- Macías, J.L., Capra, L., Arce, J.L., Espíndola, J.M., García-Palomo, A., Sheridan, M.F., 2008. Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: Constraints posed by eruptive history and computer simulations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 175 (4), 444-458.
- Major, J.J., Schilling, S.P., Sofield, D., Escobar, C.D., Pullinger, C.R., 2001. Volcano Hazards in the San Salvador Region, El Salvador. U.S. Geological Survey Open-File Report 01-366.
- Malin, M.C., Sheridan, M.F., 1982. Computer-Assisted Mapping of Pyroclastic Surges. Science, 217, 637-640.
- Pitman, E.B., Patra, A., Bauer, A., Nichita, C., Sheridan, M.F., Bursik, M., 2003. Computing debris flows. Physics of fluids, 15, 3638-3646.
- Pyle, D.M., 1989. The thickness, volume and grain size of tephra fall deposits. Bulletin of Volcanology, 51, 1-15.
- Saucedo, R., Macías, J.L., Sheridan, M.F., Bursik, M.I., Komorowski, J.C., 2005. Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: Application to hazard assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 139 (1-2), 103-115.
- Sheridan, M.F., 1979. Emplacement of Pyroclastic Flows: a review. En: Chapin, C.E., Elston, W.E., (ed): Ash-flow tuffs. Geological Society of America, Special Paper 180, 125-136.

- Sheridan, M.F., Malin, M.C., 1983. Application of Computer-Assisted Mapping to Volcanic Hazard Evaluation of Surge eruptions: Vulcano, Lipari and Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 187- 202.
- Sheridan, M.F., Stinton, A.J., Patra, A.K., Bauer, A.C., Nichita, C.C., Pitman, E.B. 2005. Evaluating TITAN2D Mass-Flow Model Using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139 (1-2), 89- 102.
- Sheridan, M.F., Wohletz, K.H., 1983. Hydrovolcanism: basic considerations and review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17, 1-29
- Sofield, D.J., 1998. History and Hazards of San Salvador Volcano, El Salvador. Thesis of Master of Science in Geology. Michigan Technological University.
- Sofield, D.J., 2004. Eruptive History and Hazards of Volcán San Salvador, El Salvador. En: Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., Major, J.J., (ed) *Natural Hazards in El Salvador*. Geological Society of America. Special paper 375, 147-158.
- Wohletz, K.H., Sheridan, M.F., 1983. A model of pyroclastic surge. *Geological Society of America Special Paper* 180, 177-194.

Capítulo III.

Amenazas Geológicas

Ponencia 22

Evaluación probabilística de la amenaza por caída de balísticos para el VSS realizada en el marco de proyecto Regional de Formación aplicada a los escenarios de Riesgos con Vigilancia y Monitoreo de los fenómenos volcánicos, sísmico (RIESCA).

Rodolfo Castro.
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales-MARN.



Evaluación probabilística de la amenaza por caída de balísticos para el volcán de San Salvador.

Rodolfo Castro

Resumen

El volcán de San Salvador está inmerso en la cadena volcánica cuaternaria de El Salvador entre las placas de Cocos y del Caribe. El Complejo Volcánico de San Salvador está rodeado por 17 municipios con una suma de más de 1.5 millones de personas según el censo poblacional de 2007.

La amenaza está representada por la caída de balísticos en futuras erupciones, en El Salvador se registran impactos de balísticos algunos con tamaño mayor a 1 m asociadas a erupciones de los volcanes de Santa Ana (2005) y San Miguel (2013). Para el volcán de San Salvador se realizó la evaluación probabilística de amenazas por caídas de balísticos y la evaluación del riesgo asociado con la amenaza por balístico. El riesgo lo representan la zona turística y comercial, algunos hospitales y escuelas que se encuentra a menos de 1 a 2 km del cráter principal.

La metodología consistió en: 1) Clasificar la información disponible para caracterizar la historia eruptiva del complejo volcánico de San Salvador, las cuales se resumen en las cinco erupciones ocurridas en el pasado teniendo en cuenta datos como el nombre de la erupción, edad, tipo de erupción, el índice de explosividad volcánica, altura de la columna eruptiva en (km), fenómeno asociado y el volumen de material expulsado en (km³).

2) Procesar datos de campo para obtener las condiciones iniciales de la balística expulsada y definir escenarios de peligro por balísticos. 3) Compilar mapas de amenaza por balísticos basados en simulaciones con el código GBF con las condiciones iniciales obtenidas en el paso anterior.

Para la simulación numérica mediante el modelo Great Balls of Fire (GBF) (Biass et al., 2016), se utilizaron datos de entrada como el DEM, coordenada de apertura, densidad y tamaño de clasto, velocidad inicial, ángulo de inclinación y de dispersión y, velocidad y dirección del viento.

Durante la simulación se realizó un proceso de inversión para obtener posibles condiciones iniciales, para esto se da como input información de los balísticos muestreados en campo, luego se obtienen los valores para los balísticos simulados; para este estudio fueron más de 2 millones de clastos y, se obtuvieron los valores iniciales de los clastos más próximos a los registrados en campo.

Luego se procede al análisis de datos donde se realiza un histograma con las velocidades iniciales para toda la distribución de balísticos y se realiza una distribución normal de las velocidades iniciales para poder obtener la velocidad principal y, obtener su desviación estándar que se utilizaron en las simulaciones para definir escenarios.

Al definir los escenarios se hacen las simulaciones y en el procesamiento indicamos los valores de energía en Joules de distintos umbrales, así también, distintos umbrales que deseamos que el código empleado muestre y definimos las coordenadas en las que se trabaja para nuestro caso UTM.

Los resultados obtenidos son salidas gráficas de energía medias obtenidas y, la envolvente para los umbrales de energía.

Una vez trabajados estos resultados y colocado sobre el mapa de localización se obtiene el mapa probabilístico de amenaza por impacto de balístico, donde vemos que para las zonas más cercana a los cráteres se tiene los valores de 50 al 100 % de probabilidad de caídas de balísticos.

Luego tenemos valores del 1 al 5 % y luego zonas menos probables de caídas de balístico del 0 al 1 % de probabilidad de impacto de balístico, esta zona se define como aquella zona donde tiene alcance la menor concentración de balísticos, la cual estaría ubicada de 6 a 7 km de la distancia al cráter y todas estas zonas son zonas de influencia o zonas, con algún grado de probabilidad de impacto por balístico.

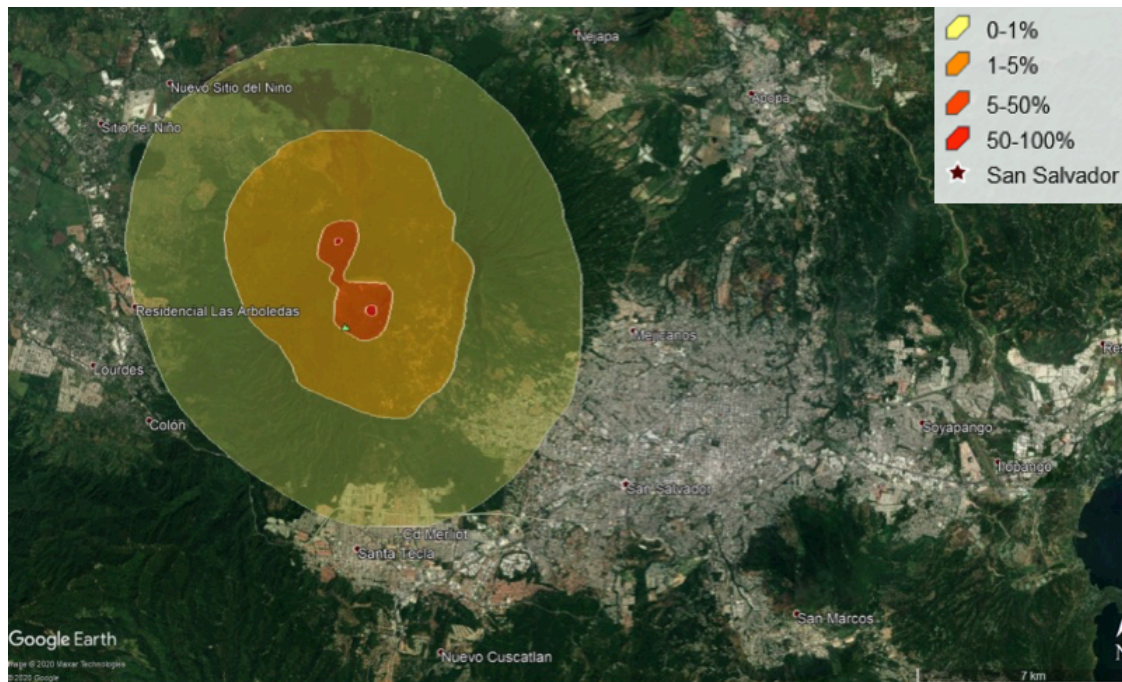


Figura 1. Mapa probabilístico de amenaza por impacto de balísticos

Como un segundo componente de este trabajo está el mapa de riesgo asociado por impacto de balístico, donde se considera la posición, la vulnerabilidad de las estructuras debido al tipo de techo ya que en su mayoría son asentamientos poblacionales con estructuras muy débil, solamente, algunos edificios pueden tener techos de concretos reforzados, que pueden resistir algún impacto por balístico, haciendo estas consideraciones se tiene valores de riesgo alto, valores de riesgo medio y valores de riesgo bajo todos están dentro de la zona de influencia, se concluye que la mayoría de la zona metropolitana se encuentra en una zona de riesgo muy bajo tomando en cuenta los dos centros eruptivos estudiados.

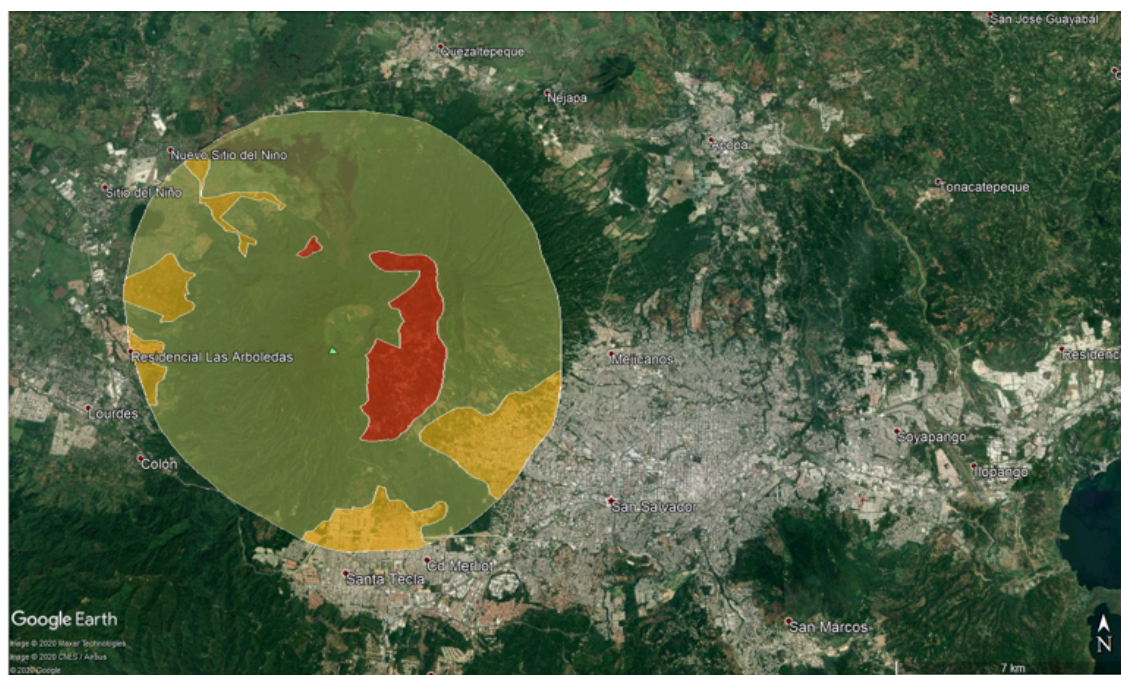


Figura 2. Mapa de riesgo asociado por impacto de balísticos.

En conclusión, las zonas con valores de mayor probabilidad de impactos se encuentran en un radio de 1 km, el área total expuesta al riesgo es de unos 167 km² (de 5 a 6 km desde el cráter) y recordar que los límites de las zonas establecidas se deben de tomar siempre como referencia y, no como absolutos.

Referencias bibliográficas

- Biasi, S., Falcone, J.-L., Bonadonna, C., Di Traglia, F., Pistolesi, M., Rosi, M., Lestuzzi, P., 2016. Great Balls of Fire: A probabilistic approach to quantify the hazard related to ballistics | A case study at La Fossa volcano, Vulcano Island, Italy. J. Volcanol. Geotherm. Res. 325, 1-14.
- Ferrés, D. (2014). "Estratigrafía, Geología y evaluaciones de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador)". [Tesis doctoral]: Universidad Nacional Autónoma de México, p. 296.

Capítulo III.

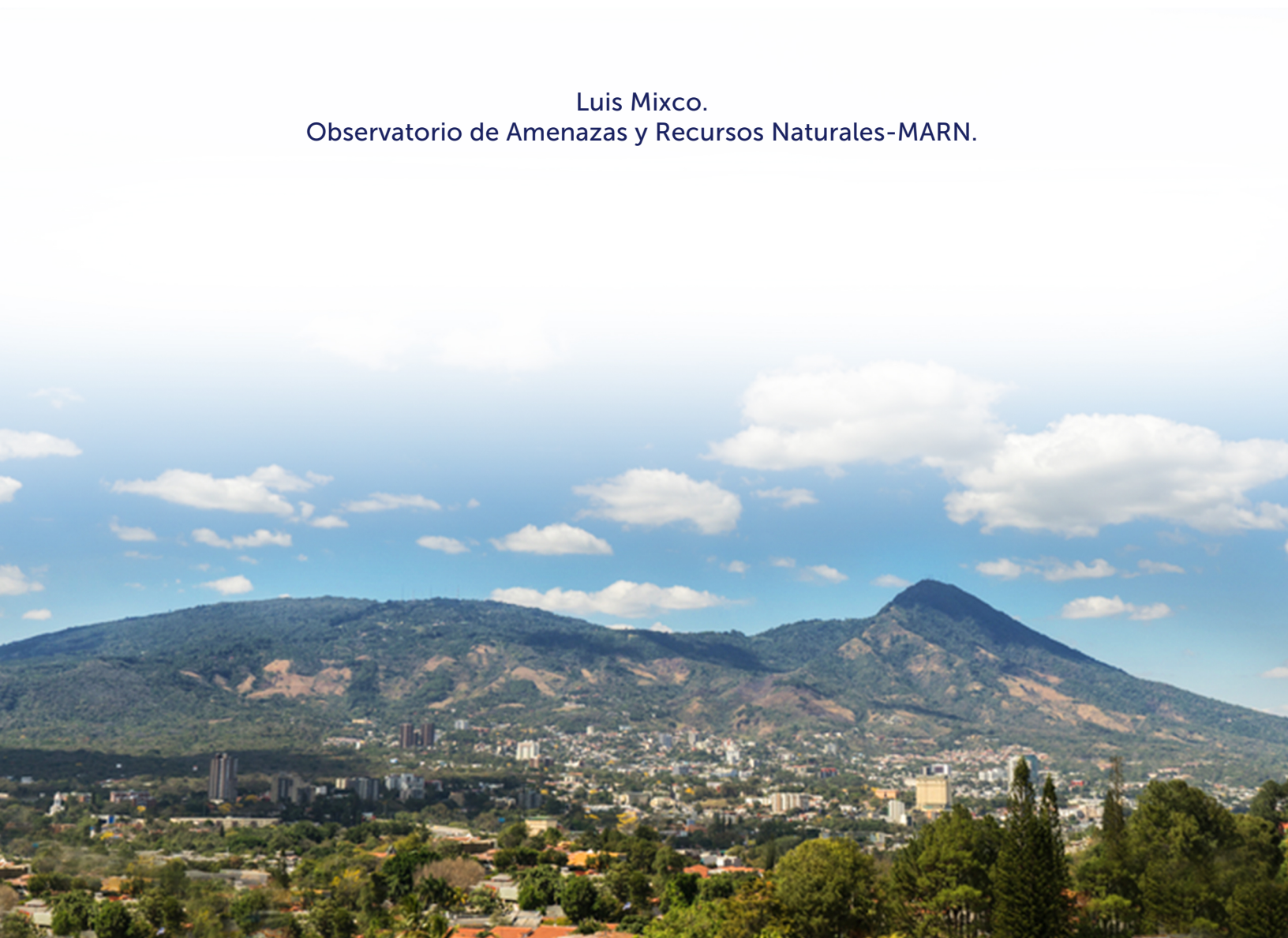
Amenazas Geológicas

Ponencia 23

Evaluación reciente de amenaza sísmica en el país, con énfasis en San Salvador y condiciones de amplificación de sitio asociadas.

Luis Mixco.

Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales-MARN.



Evaluación reciente de amenaza sísmica en el país, con énfasis en San Salvador y, condiciones de amplificación de sitio asociadas.

Luis Mixco

Resumen

El Salvador, en las últimas cuatro décadas, ha sufrido los efectos de terremotos de las dos principales fuentes sísmicas que afectan al país: los superficiales debido a la activación de fallas geológicas locales (eventos de 1965 y 1986) y, los provenientes del mar debido a procesos de subducción (eventos del 2001).

La evaluación de amenaza sísmica sobre El Salvador se ha materializado mediante la utilización de las herramientas más novedosas (hasta la fecha), para el cálculo de peligrosidad sísmica desde un punto de vista probabilístico, junto con la consideración del actual estado del arte en la concepción de fuentes sísmicas, sobre el ambiente tectónico salvadoreño, donde tanto la sismicidad superficial como de subducción son imperantes.

De igual manera, se ha compilado un catálogo sísmico que abarca un período desde 1522 hasta 2019, derivándose los respectivos análisis de recurrencia y cálculo de probabilidades de ruptura, en cada una de las fuentes sísmicas evaluadas.

Este catálogo se ha delimitado geográficamente a una zona conservadora donde se atribuye una influencia sísmica sobre El Salvador y, que incluye propiamente, las principales fuentes sísmicas del país.

Esta compilación se basó en la recopilación de información de diversas fuentes, con el propósito de depurar aquellos eventos que hayan sido registrados por más de una fuente consultada. En resumen, el catálogo contiene un total de eventos de 100, 535 con rangos de Mw de 1.5 – 8.1 y, al menos, 630 eventos con mecanismo focal.

Por otro lado, también se ha considerado una nueva caracterización del movimiento fuerte con el objetivo de aplicar modelos de atenuación más congruentes con la respuesta sísmica del terreno (en términos de aceleración), frente a la ocurrencia de sismos para las fuentes sísmicas más importantes del país.

Como resultado se han obtenido mapas probabilísticos de amenaza sísmica para el país, considerando diferentes períodos de retorno y diferentes ordenadas espectrales bajo el contexto de filosofías recientes de diseño por desempeño estructural.

En estos mapas se identifican cuáles son las localidades de El Salvador, que presentan una mayor recurrencia respecto a la generación de sismos, así como también, el mayor potencial de peligrosidad sísmica, en términos, de aceleraciones del terreno.

En el mismo sentido, para conocer cuáles son los escenarios sísmicos más importantes que contribuyen a la amenaza sísmica para un lugar en específico, una propia medida de intensidad y un período de retorno definido, fue necesario realizar un cálculo de desagregación sísmica, con objeto de conocer cuál es el par (magnitud y distancia de ruptura), más probable que ocurra en el tiempo de investigación analizado.

Por lo que se construyeron gráficos tridimensionales donde se observan las contribuciones parciales de distintos intervalos de magnitud y distancia a los diferentes movimientos del terreno. Con ello, se trata de tener una idea de los sismos de control que más contribuyen a los movimientos de corto y largo período del movimiento.

Centroamérica se encuentra emplazada dentro del conjunto de configuraciones tectónicas que constituyen la Fosa Mesoamericana, cuya actividad sísmica es compleja debido a la notable variación en la dinámica del proceso de subducción a lo largo de toda su extensión.

En la actualidad, se ha avanzado sustancialmente en la caracterización de la estructura tectónica del Graben Central Centroamericano, conocida comúnmente como la Zona de Falla de El Salvador (ESFZ).

Martínez-Díaz, et al., 2020 en su estudio nos presenta que dicha estructura presenta cuatro dominios tectónicos particulares (Figura 1), los cuales permiten describir, tanto los regímenes de deformación existentes como los diferentes mecanismos de rupturas de los sismos, que ocurren dentro de ellos; siendo esta información valiosa para ser incorporada en el análisis de amenaza sísmica.

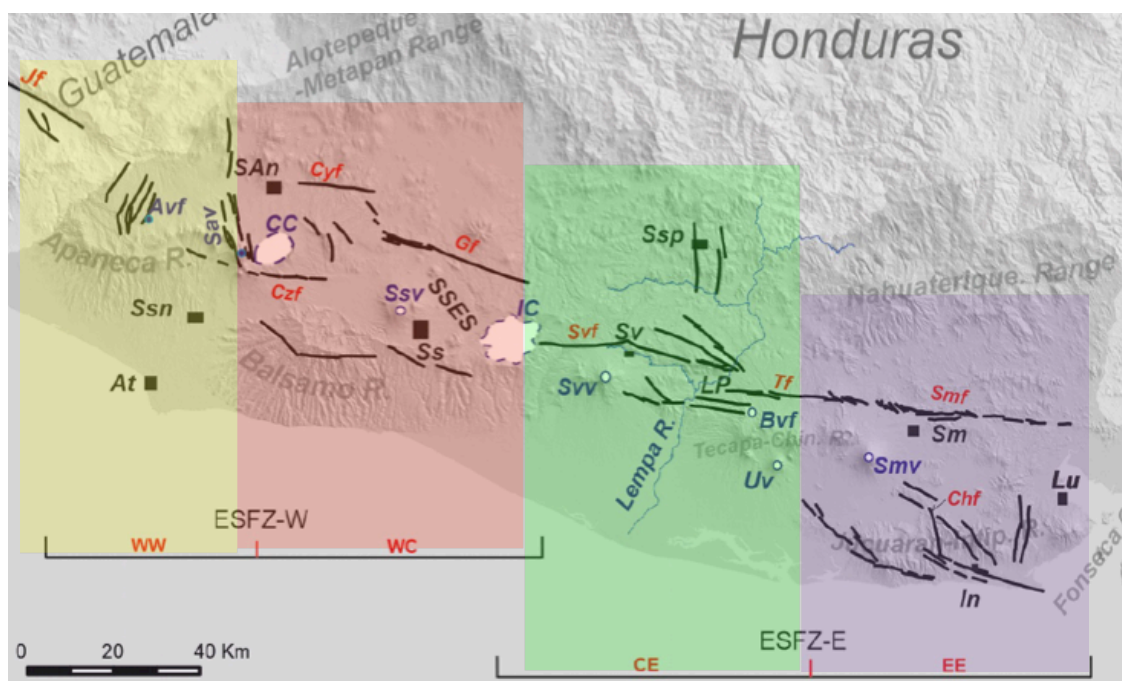


Figura 1. Mapa esquemático de la Zona de Fallas de El Salvador con las principales fallas de los cuatro dominios tectónicos-estructurales. Fuente: Martínez-Díaz, et al., 2020.

Dentro de las diversas maneras de representar las zonas con potencial sísmico, se presentan aquellas que son consideradas, para esta evaluación de amenaza, como las más innovadoras y que representan, actualmente, el estado del arte de concepción de fuentes sísmicas

Para el contexto tectónico de El Salvador se identifican tres tipos de zonificaciones principales: i) Corteza Superficial Activa (*Active Shallow Crust*) y Exterior Emergente (*Outer-Rise*), ii) Subducción Interfase (*Subduction Interface*), y ii) Subducción Intraplaca (*Subduction IntraSlab*).

En la Figura 2, se pueden apreciar la localización geográfica de cada una de estas zonas, así como, sus principales características, respecto a sus profundidades de rupturas.

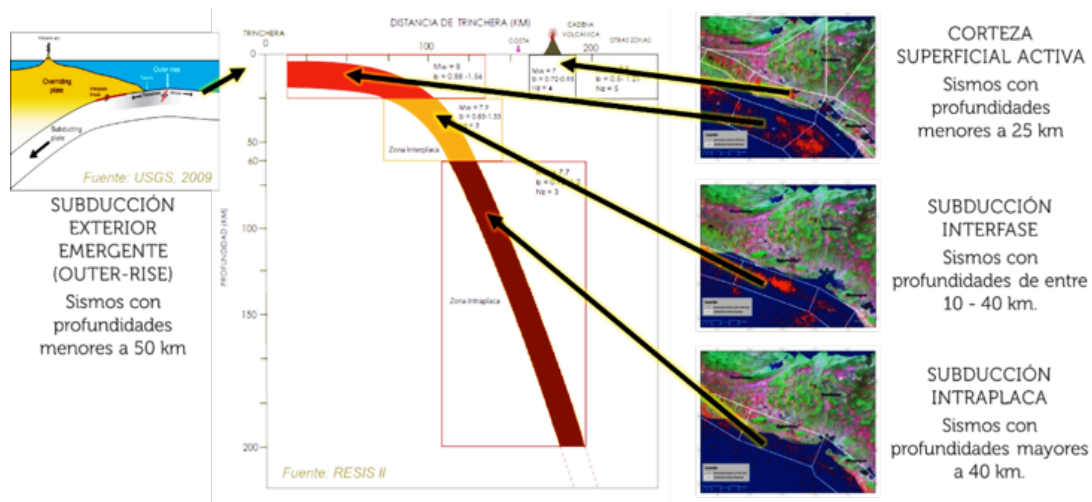


Figura 2. Concepción de principales fuentes sísmicas que influyen directa e indirectamente a El Salvador.

En lo que respecta a la Corteza Superficial Activa, los sismos que se producen tienen profundidades menores a 25 km, asociados a sistemas de fallas de Guatemala, a la zonificación de graben de Guatemala y Honduras, los sismos que ocurren a poca profundidad sobre la placa del Caribe, los arcos volcánicos de Guatemala y Nicaragua y, particularmente la Zona de Falla de El Salvador (ESFZ).

Por otro lado, en la fuente de Subducción Interfase se generan sismos con profundidades entre 10 – 40 km, asociados (principalmente), al débil acople existente entre la Placa de Cocos y El Caribe, frente a nuestras costas.

En la fuente de Subducción Intraplaca se generan sismos con profundidades mayores a 40 km, asociados siempre a la interacción entre la placa de Cocos y del Caribe, predominando esfuerzos de compresión debido al desplazamiento hacia abajo de la Placa de Cocos.

Finalmente, en la Subducción Exterior Emergente se generan sismos con profundidades menores a 50 km, asociados al efecto de flexo-compresión inicial que existe entre las placas.

Una vez comprendido el contexto geo-tectónico del territorio salvadoreño, traduciéndose en la configuración y concepción geométrica de las fuentes sísmicas que más influyen sobre el mismo; aunado a la posterior modelación matemática consensuada de cada de estas fuentes, el análisis del movimiento fuerte a partir de los registros acelerográficos que son almacenadas en las estaciones acelerográficas del país; se procede al cálculo de la peligrosidad sísmica a nivel nacional bajo un enfoque probabilístico.

¿El porqué de un enfoque probabilístico?

La respuesta radica, principalmente, por la perspectiva conservadora que conlleva sus resultados; ya que con esta concepción se puede determinar para un sitio (o localización geográfica) una peligrosidad sísmica integral, la cual considera el aporte de una cantidad de escenarios sísmicos estocásticos posibles, provenientes de diferentes fuentes sísmicas.

Es decir, se puede calcular el peor evento que puede ocurrir con una determinada probabilidad de excedencia (período de retorno), dentro de un determinado período de tiempo o dentro de una determinada probabilidad anual.

Lo anterior, no se lograría con un enfoque determinista, donde se evalúa específicamente, para un solo escenario sísmico (es decir, la ruptura de una sola fuente sísmica), la peligrosidad que influiría sobre determinado sitio.

No obstante, con el análisis probabilístico, podrían considerarse diferentes valores de magnitud de terremotos, todas las distancias posibles entre la fuente sísmica y el sitio de interés; así como, la variabilidad de los parámetros focales, que configuran los procesos de ruptura de determinada fuente sísmica.

Adicionalmente, se pueden considerar todas las incertidumbres relacionadas con la localización, tamaño, frecuencia de ocurrencia y los efectos de los sismos y, las combina todas para calcular la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de movimiento del terreno.

Las modelaciones de la amenaza sísmica se han desarrollado con una resolución espacial de 5 km, debido al tiempo y recursos necesarios para el procesamiento.

Por lo que luego de obtener estos resultados, se hizo un resampleo del producto y se llevó a una resolución más fina de 1 km.

Asimismo, se han realizado todas las ejecuciones considerando una condición de sitio basado en suelo firme, correspondiente a un valor de Vs30 (velocidad de ondas de corte promedio en los primeros 30 metros superiores) de 760 m/s.

En la Figura 3, se muestra un mapa de El Salvador con los resultados obtenidos tras la ejecución de la amenaza sísmica probabilística, en términos de aceleraciones máximas de terreno (medida de intensidad: PGA), las cuales poseen un 10 % probabilidad de exceder en un tiempo de investigación de 50 años (comúnmente asociado a la vida útil de una edificación), correspondiente a un período de retorno de 475 años.

Cabe mencionar, que este resultado fue obtenido siguiendo el enfoque de zona rígida (método Cornell-McGuire), utilizando tanto los modelos de fuente sísmica explicados antes (integración de fallas geológicas y sismicidad suavizada, probabilidades de ruptura de la subducción intraplaca, etc.), como los modelos de atenuación o ecuaciones de predicción obtenidos tras la caracterización y evaluación del movimiento fuerte de El Salvador (haciendo uso de registros acelerográficos propios de nuestro país).

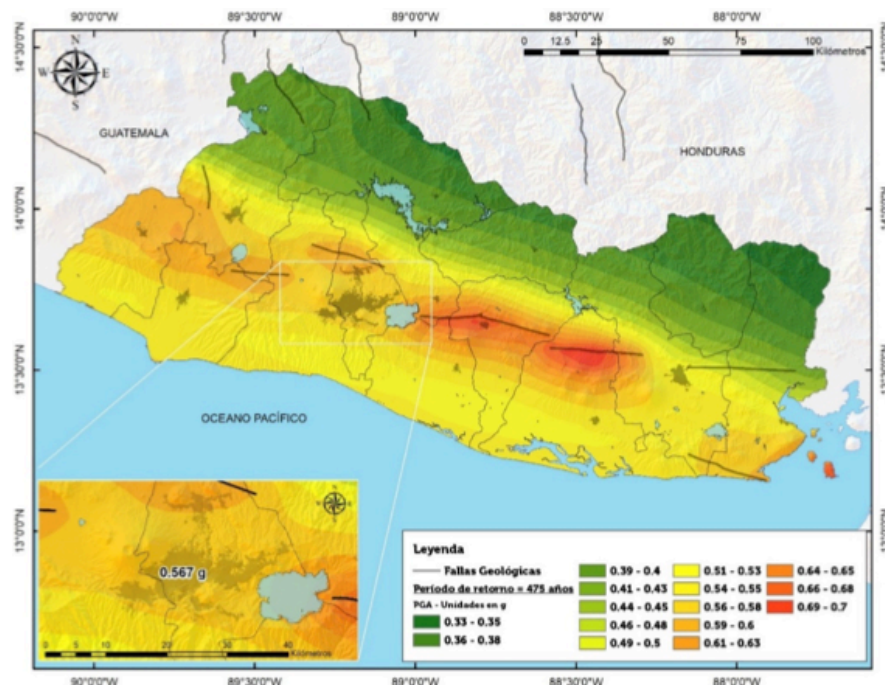


Figura 3. Mapa probabilístico de amenaza sísmica para una medida de intensidad PGA, bajo una condición de suelo firme y 475 años de periodo de retorno. Fuente: MARN, 2021.

Al observar el mapa, se concluye que la amenaza sísmica del país es ALTA. Asimismo, es evidente que se marca una clara diferencia entre los niveles de aceleración que ocurren desde el borde norte de la Zona de Falla de El Salvador (Cadena Volcánica del país) hacia el territorio hondureño (registrándose valores bajos), comparados con aquellos calculados hacia la zona sur del territorio; donde figuran aceleraciones importantes del terreno, debido principalmente, a la activación de fallas geológicas y la proximidad a fuentes de la subducción.

Como se evidencia en el mapa de la Figura 3, los resultados obtenidos para el área de San Salvador, han arrojado un valor de PGA (de 0.56 g), con un período de retorno de 475 años. Por otro lado, para un período de retorno de 2475 años con un valor de SA (1.0s), este valor asciende a 0.61 g.

Básicamente, son este tipo de mapas que, de manera general, permiten zonificar la peligrosidad sísmica y, proporcionar un soporte técnico científico, para dictar sus directrices y planes de acción hacia aquellos lugares donde se visualiza una mayor amenaza sísmica.

Aunado a lo anterior, estos productos pueden desagregarse y sugerir escenarios sísmicos que más contribuye a la peligrosidad. Esto representaría un gran aporte para visualizar, aquellas localidades dentro del territorio que se verían más afectadas (en términos de nivel de aceleración, y, por ende, mayores niveles de intensidad sísmica), después de un evento con parámetros específicos.

El análisis de desagregación realizado para esta evaluación de amenaza sísmica, con un período de retorno de 475 años y sobre la aceleración máxima del terreno (PGA), indica que, para el caso de San Salvador, los pares de parámetros sísmicos [Magnitud y Distancia de Ruptura], que más contribuyen a la amenaza, corresponden a eventos locales (visualizados en las gráficas del lado izquierdo de la Figura 4), que se localizarían a cortas distancias de las fuentes.

No obstante, los pares sísmicos provenientes de la zona de subducción (visualizados en las gráficas del lado derecho de la Figura 4), también proporcionan un aporte importante para la peligrosidad sísmica sobre San Salvador.

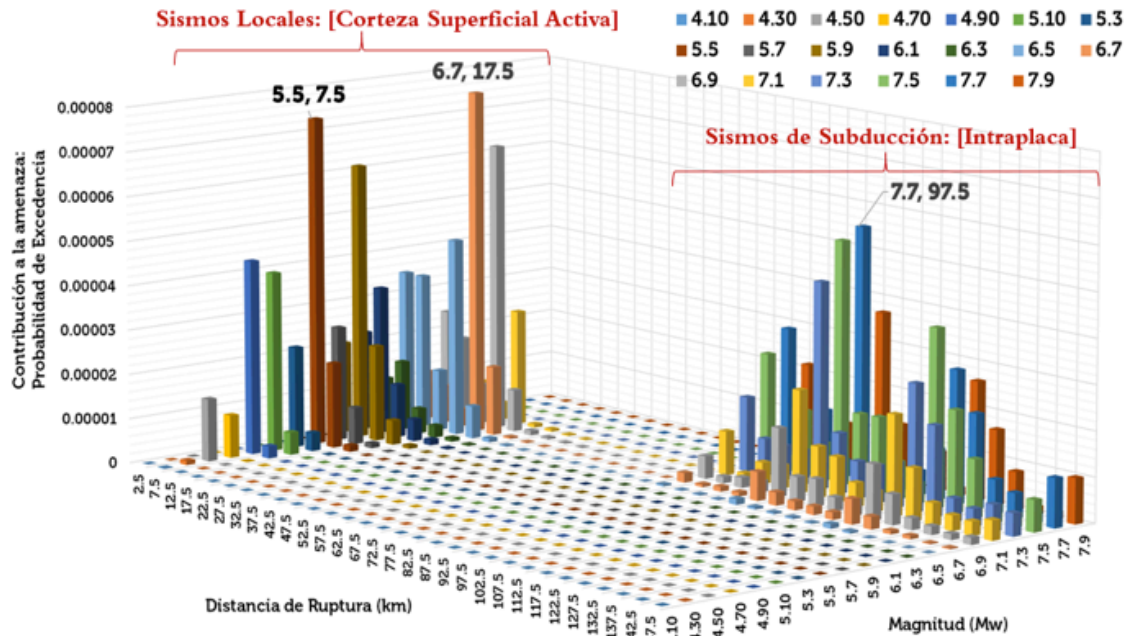


Figura 4. Desagregación sísmica para PGA y período de retorno: 475 años. MARN, 2021

Fuente:

Para la estimación del efecto del sitio se han empleado dos técnicas que incluyen métodos empíricos (utilizando registros acelerográficos de El Salvador) y, métodos teóricos/analíticos (utilizando perfiles de suelo representativos de El Salvador); con los cuales se pudo obtener una función de transferencia característica para tipos de suelos específicos a nivel nacional, considerando la no-linealidad que los diferentes estratos del suelo podrían experimentar durante una sacudida intensa.

En la Figura 5, se pueden observar seis funciones de transferencias típicas obtenidas para diferentes tipos de suelos del país.

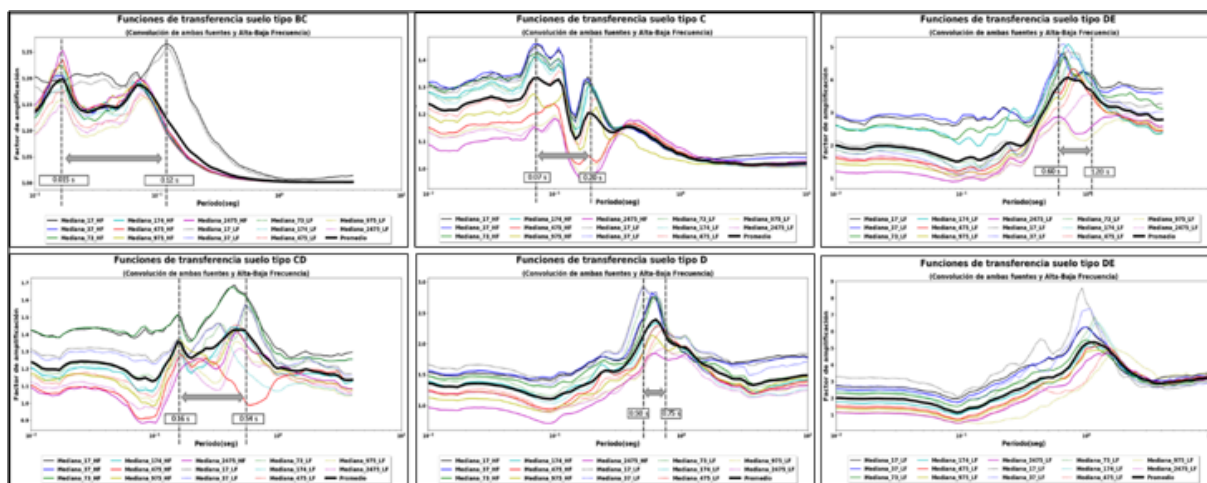


Figura 5. Funciones de transferencia en seis tipos de suelos encontrados en el país.

Cabe mencionar, que para dicho cálculo se utilizó la información de 15 nuevas perforaciones realizadas en formaciones geológicas particulares del país, a las cuales se les determinó su perfil de velocidad de ondas de corte mediante la técnica *Down-Hole* y, con la que se logró caracterizar el comportamiento dinámico de dichas unidades. Aunado a lo anterior, se extrajeron muestras de los pozos con el fin de realizar ensayos geomecánicos y dinámicos en el laboratorio.

Por otro lado, para propósitos de clasificación de tipos de suelo a nivel nacional y poder asignar las funciones de transferencia obtenidas a una zona geográfica en particular, se generó un mapa de velocidades de corte promedio a 30 metros de profundidad (V_{s30}) de El Salvador, el cual representaría una estimación robusta de los efectos de amplificación del suelo.

Se pretende que este mapa funcione como un diferenciador geográfico de tipos de suelo, y que, de manera general, se logre agrupar geoméricamente aquellos estratos de suelo, que podrían tener un comportamiento homogéneo frente al paso y propagación de ondas sísmicas a lo largo de sus subunidades.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

Para desarrollar este mapa se emplearon técnicas de aprendizaje supervisado (*machine learning*), para la obtención de un mapa de tipo de suelos de acuerdo a la NEHRP la cual se encarga de clasificar el tipo de suelo de acuerdo al Vs30. El mapa resultante se puede observar en la Figura 6.

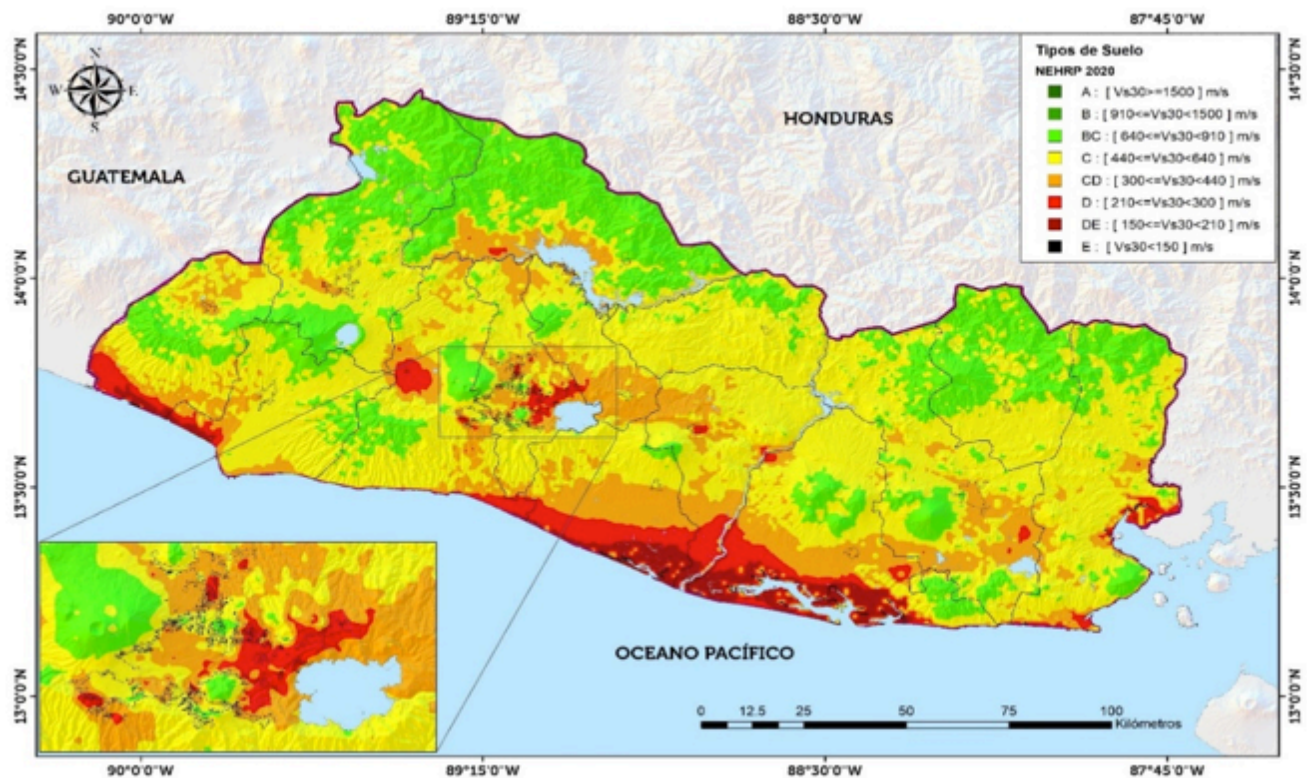


Figura 6. Mapa de Vs30 de El Salvador.

Con los resultados de estudio se concluye que El Salvador presenta una amenaza sísmica considerada como ALTA, debido principalmente, al aporte de la sismicidad local debido a la activación de fallas geológicas y, que de acuerdo a la desagregación sísmica para un punto en San Salvador (emplazado en la cadena volcánica), la ocurrencia de escenarios sísmicos con Mw 6.7 y Mw 5.5, presentan aproximadamente, la misma contribución al peligro sísmico.

De igual manera, se ha intentado en lograr de obtener funciones de transferencia que posean una forma espectral, que más se acerque a nuestra realidad y complejidad de nuestros suelos, con miras a mejorar nuestros diseños sísmicos.

Referencias bibliográficas

Martínez Díaz, José J. y Álvarez Gómez, José Antonio y Staller, Alejandra y Alonso Henar, Jorge y Canora Catalán, Carolina y Insúa Arévalo, Juan Miguel y Tsige Aga, Meaza y Villamor Pérez, María Pilar y Herrero Barbero, Paula y Hernández Moreno, Catalina y Hernández, Walter y Hernández, Douglas y Marroquín, Griselda y Mixco, Luis (2021) Active faults of El Salvador. Journal of South American Earth Sciences, 105 (103038). ISSN 0895-9811.

Capítulo III.

Amenazas Geológicas

Ponencia 24

Confección de mapas de probabilidad de apertura de respiraderos en el Complejo Volcánico San Salvador y su utilización para evaluar el riesgo asociado a distintos fenómenos volcánicos.

Álvaro Aravena.
Laboratoire Magmas et Volcans de la Universidad Clermont Auvergne,
en Francia-RIESCA.



Investigación base de la probabilidad de nuevos centros eruptivos.

Álvaro Aravena, Université Clermont Auvergne.

Resumen

El complejo volcánico San Salvador (CVSS), se encuentra ubicado en una zona densamente poblada en las cercanías de la capital de El Salvador y otros centros urbanos. Está compuesto por un cono poligenético central (El Boquerón), el cual está emplazado en el interior de un antiguo edificio volcánico llamado San Salvador y, al menos, 25 edificios volcánicos monogenéticos dentro de los cuales se tiene conos de escorias, maars, anillos de tobas, conos de tobas y cráteres explosivos, ubicados en los flancos sureste, noroeste y al norte del volcán.

Su emplazamiento parece estar fuertemente controlado por dos sistemas de fallas nombrados: Falla A, con rumbo N40OE y; Falla B, con rumbo N65OE (Figura 1).

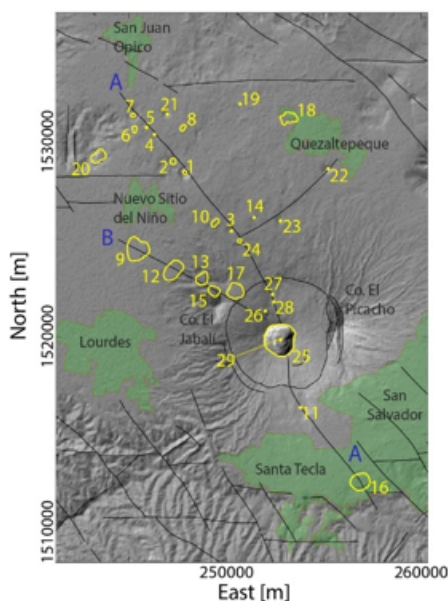


Figura 1. Ubicación del complejo volcánico San Salvador.

Su historia eruptiva presenta tres períodos principales (Ferrés et al., 2013; Ferrés, 2014):

- **Etapla 1 (> 72 ka – 36 ka):** corresponde a la construcción y colapso del volcán San Salvador.
- **Etapla 2 (36 ka – 3 ka):** corresponde a la construcción del cono, actualmente activo, El Boquerón, con productos tanto efusivos como explosivos.
- **Etapla 3 (< 3 ka):** la actividad volcánica tendió a presentarse en los flancos del volcán y las zonas aledañas

Sofield sugiere, que esta modificación en el tipo de vulcanismo se debe a que se alcanzó la altura crítica del edificio El Boquerón, desplazando la actividad desde el cráter central hacia los flancos del volcán. Sofield (2004), propone cinco escenarios eruptivos:

1) Erupción hidromagmática en los flancos del volcán (VEI 1-3); 2) Erupción magmática en los flancos del volcán (VEI 1-3); 3-Erupción de pequeña escala en el cono central (VEI 1-3); 4) Erupción sub-Pliniana en el cono central (VEI 4-5); 5) Erupción Pliniana en el cono central (VEI 6).

¿Cómo estudiar erupciones cuando no conocemos la posición de apertura del respiradero?

La metodología propuesta es la confección de mapas de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos, considerando la correlación existente entre posición del respiradero y estilo eruptivo.

Para la confección de mapas de probabilidad de apertura de nuevos centros eruptivos para el complejo volcánico San Salvador se consideraron separadamente distintos fenómenos volcánicos: flujos de lava, corrientes de densidad piroclástica de pequeña escala, depósitos de caídas de pequeña escala, fragmentos balísticos.

Los datos utilizados incluyen: posición de los centros eruptivos pasados, información estructural y estilos eruptivos de las erupciones documentadas.

La metodología utilizada consiste en dos modelos, el modelo 1 considera las estructuras geológicas y la posición de eventos pasados siguiendo un enfoque Bayesiano; el modelo 2 no utiliza información de las estructuras geológicas si no que realiza la aplicación de un estimador Kernel de densidad sobre las áreas que engloban la posición de los distintos centros eruptivos pasados.

Debido a que los parámetros que asignan el peso a los distintos componentes del modelo no son fácilmente estimables, se debe considerar un rango de incerteza para cada uno de ellos. Los resultados que se obtienen con la aplicación de la metodología son mapas con la probabilidad de apertura de un nuevo centro eruptivo condicionado a la ocurrencia de una erupción capaz de producir los distintos fenómenos volcánicos estudiados.

En la Figura 2, se presenta un mapa de probabilidad de apertura de unos centros eruptivos condicionados a eventos capaz de producir flujos de lava, estas probabilidades se presentan en porcentajes por km².

A la izquierda se incluye el valor medio de la probabilidad calculada, variando los distintos parámetros que definen nuestro modelo. Mientras que, a la derecha se puede observar el intervalo de confianza de estos valores de probabilidad incluyendo los percentiles 5 y 95 %.

Podemos notar que el máximo de probabilidad de apertura para estos eventos se observa en la porción norte de la Falla A, que es una zona donde una parte significativa de los edificios monogenéticos corresponden a conos de escoria, si consideramos el mapa de valores medios se puede calcular una probabilidad de 39.3 % de una erupción en los flancos del volcán, capaz de producir flujo de lava ocurra en el entorno de la porción norte de la Falla A. Mientras que, esta probabilidad desciende a un 13,9 % si se considera la Falla B y un 7 %, si se considera la porción sur de la Falla A.

Estos resultados pueden ser acoplados con modelos numéricos que sean capaces de describir la propagación de distintos fenómenos volcánicos en superficie. En

nuestro caso, el estudio de corrientes de densidad piroclástica se realizó mediante el modelo *branching energy cone model* (software EMapProb), que permite describir de mejor manera los procesos de canalización de materiales piroclásticos y, para la dispersión de piroclastos transportados por columnas eruptivas sostenidas, generadoras de depósitos de caídas se utilizó el modelo Tephra 2 (software TephraProb), que permite describir la dispersión de piroclastos de una columna eruptiva utilizando el enfoque probabilístico.

Esto permite obtener mapas de hazard (mapas de probabilidad de inundación), que integren los datos de probabilidad de apertura de respiraderos con la dinámica de transporte de material volcánico en la atmósfera.

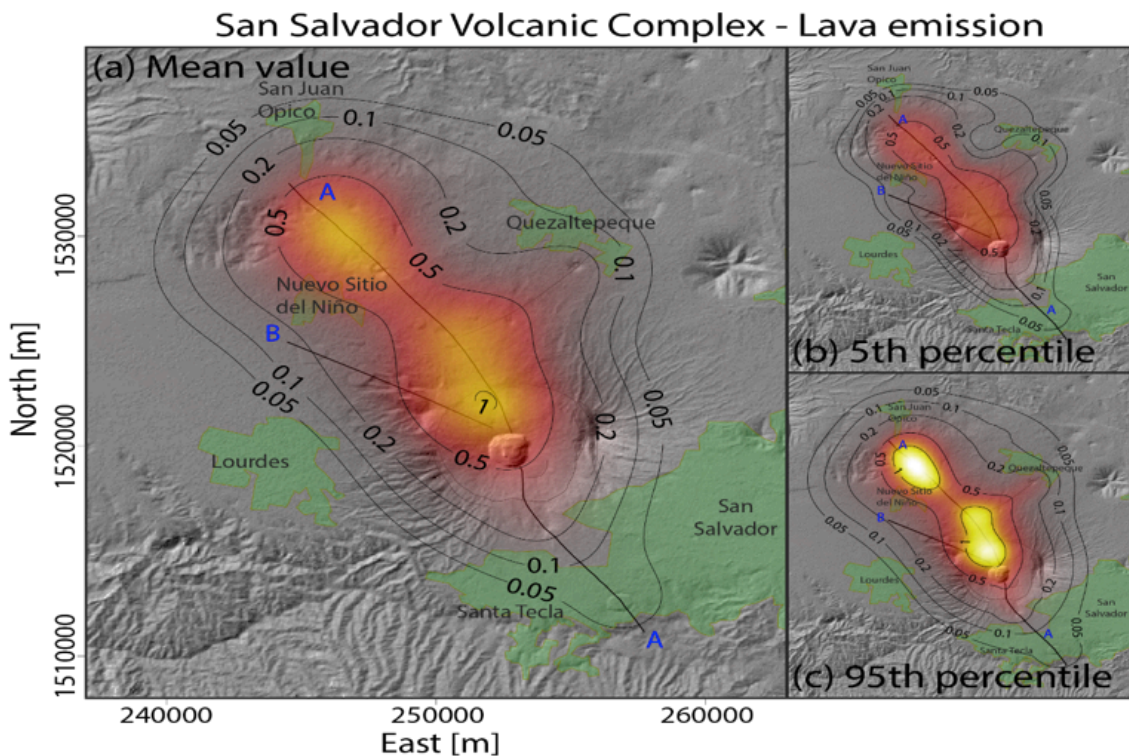


Figura 2. Mapa con la probabilidad de apertura de un centro eruptivo condicionado a un evento capaz de producir flujo de lava para el Complejo Volcánico San Salvador. (a) Valor medio, (b) Percentil 5, (c) Percentil 95.

Referencias bibliográficas

- Bevilacqua, A.; Aravena, A.; Neri, A.; Gutiérrez, E.; Escobar, D.; Schliz, M.; Aiuppa, A.; Cioni, R. (2021). Thematic vent opening probability maps and hazard assessment of small-scale pyroclastic density currents in the San Salvador volcanic complex (El Salvador) and Nejapa-Chiltepe volcanic complex (Nicaragua). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(5), 1639-1665. Doi: 10.5194/nhess-21-1639-2021.
- Ferrés, D. (2014). "Estratigrafía, Geología y evaluaciones de peligros volcánicos del complejo volcánico de San Salvador (El Salvador)". [Tesis doctoral]: Universidad Nacional Autónoma de México, p. 296.
- Ferrés, D.; Delgado-Granados, H.; Gutiérrez, R.E.; Farraz, I.A.; Hernández, E.W.; Pullinger, R.C. (2013). "Explosive volcanic history and hazard zonation map of Boqueron volcano (San Salvador Volcanic Complex)", pp. 201-230. In Rose, W.I.; Palma, J.L.; Delgado-Granados, H., and Varley, N., eds. *Geol. Soc. Amer. Special Paper 498*. Doi: 10.1130/2013.2498 (12).
- Sofield, D.J. (2004). Eruptive history and hazards of Volcán San Salvador, El Salvador, p. 147-158. in Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J., eds., *Natural Hazards in El Salvador: Geological Society of America Special Paper 375*.

Capítulo IV.

Monitoreo Volcánico

Ponencia 25

Pronóstico Basado en Impactos.

Jaqueline Rivera.
Especialista en impactos.
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.



Pronóstico Basado en Impactos.

Jacqueline Rivera.

Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.

Resumen

El enfoque de pronóstico basado en impactos busca naciones preparadas para responder y afrontar los impactos adversos que una amenaza de origen natural tiene potencial de generar. Ante lo anterior, surge la pregunta: ¿qué es estar preparados? El concepto de preparación es muy amplio y engloba aspectos tales como: la creación de planes de contingencia, obras de mitigación y preparación para afrontar cualquier amenaza.

En términos generales, preparación es una acción para desarrollar las capacidades necesarias en la gestión eficaz de todos los tipos de emergencia y lograr transiciones metódicas y ordenadas desde la respuesta hasta una recuperación sostenida.

El Salvador inició con la implementación de este enfoque de pronósticos, durante el año 2016, a través del proyecto *Weather Ready Nations* (WRN, por su sigla en inglés).

El WRN es iniciativa de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), que busca “Naciones preparadas frente al tiempo y el clima”, teniendo como recursos pronósticos y avisos basados en impactos, centrándose en el fortalecimiento de las capacidades de los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales y las Agencias Nacionales de Gestión de Desastres.

Su objetivo es ayudar a mejorar el uso de la información meteorológica y climática para salvar vidas, reducir el daño humano y los impactos económicos ante amenazas hidrometeorológicas y, por lo tanto, es una nación lista, receptiva y resiliente a través de pronósticos que apoyen a los administradores de emergencias, socorristas, gobiernos, empresas y público en general para tomar decisiones.

Este enfoque permite considerar aspectos importantes como los que se detallan a continuación:

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

Oportunidades para mejorar la resiliencia de los sistemas de infraestructura vital

En temas de gestión de riesgos, los sistemas de gobernanza deben tomar en cuenta áreas basadas en ingeniería, con pensamiento sistémico, técnicas de pre/post, desastre anticipación/identificación, soluciones basadas en la naturaleza, combinar infraestructura gris y verde, creación redundante, diversificación y descentralización, enfoque de modelos y otras medidas alternativas.

Así también, áreas no basadas en ingeniería con enfoque del conocimiento; tales como compartir el conocimiento y enfoque de "diseño centrado en el ser humano".

Estas prácticas permiten desarrollar las habilidades de monitoreo, mitigación, respuesta, recuperación y memoria histórica.

Enfoque del conocimiento

Un enfoque cognitivo ayuda a determinar cómo piensan, perciben, se comportan y deciden los controladores del sistema en el momento de la falla o la interrupción. Se resume a todos los procesos requeridos para conocer el fenómeno natural, sus amenazas y los riesgos asociados. La iniciativa de implementación del WRN surgió en el 2016, creando mesas de trabajo y matrices.

Durante los años 2017 y 2018, se evaluaron los puntos más afectados del país en época lluviosa y susceptibles ante amenazas hidrometeorológicas, siendo así que en el 2018 que se puso en marcha protocolos y herramientas para emitir este tipo de pronósticos a la población.

Si bien se dio inicio con amenazas hidrometeorológicas, El Salvador ha incluido a este enfoque amenazas de otro origen creando así los pronósticos multiamenazas. Para lo anterior, fue necesario estimar niveles vulnerabilidad en infraestructura y población y, de esta manera estimar adecuadamente los niveles de severidad de los impactos, y recolectando esta información se crean las bases de datos que sean necesarias y eficientes.

La información de las potenciales amenazas y las características de los sitios donde se espera que ocurran se traduce a mapas de amenazas en un código de colores

tipo semáforo, con base en, una matriz de impactos (ver Figura), que combina el grado de probabilidad de que ocurra el impacto y el grado de severidad del impacto esperado.

Estas matrices se denominan matrices de riesgo.

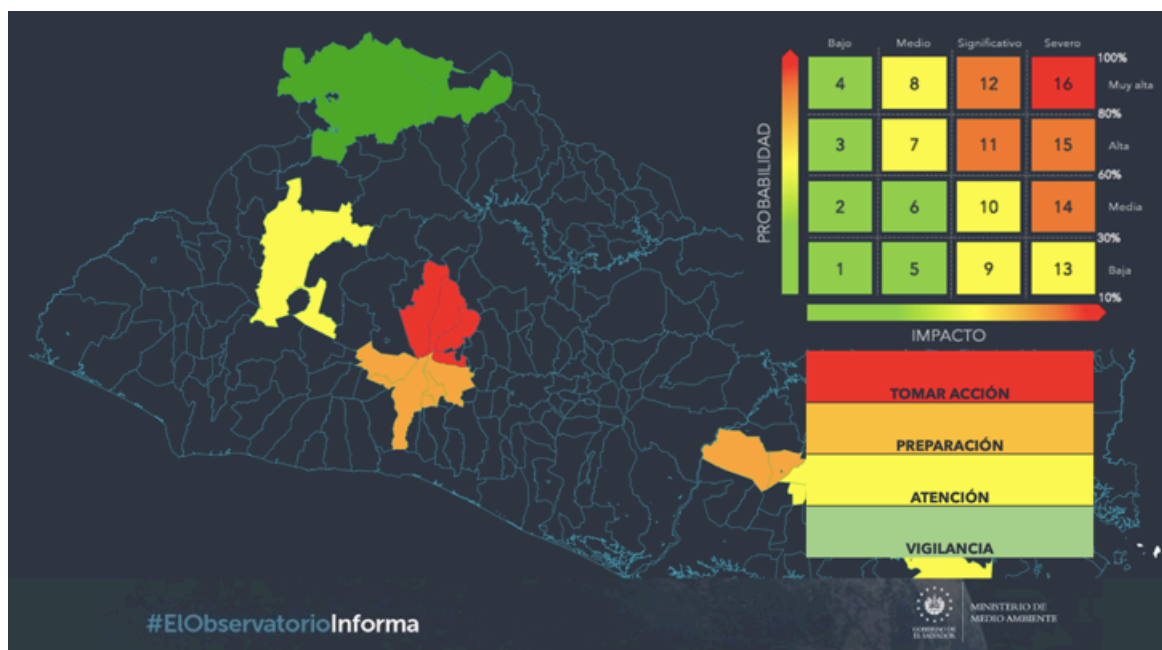


Figura 1. Matrices de evaluación de riesgo

La identificación del riesgo por lo tanto puede ser concebida en tres dimensiones: La probabilidad de que un impacto ocurra, el nivel de severidad del impacto y el nivel de vulnerabilidad de la zona donde el impacto ocurrirá. Tomando en cuenta también, el tiempo en el que va a ocurrir, la localización, espacio temporal, espacio físico, uso del espacio físico, asociación de impactos, efecto del impacto, duración del evento, entre otros.

El manejo de la información en tiempo real y los procesos de comunicación de los pronósticos debe ser eficiente, para ello se crean páginas web, aplicaciones y diferentes formatos de productos (pronósticos).

En El Salvador, las áreas de meteorología, sismología, vulcanología, hidrología y deslizamientos, proporcionan información trabajan continuamente para mejorar en la implementación de este enfoque de emisión de la información relacionada a las potenciales amenazas.

Objetivo básico

En el caso de la actividad volcánica, el evento primordial a detectar es una posible erupción volcánica. Las erupciones volcánicas, por su peligrosidad, pueden llegar a generar impactos asociados a los diferentes fenómenos volcánicos (caídas de ceniza, balísticos, flujos de lava, entre otros).

Para resumir esta complejidad, los fenómenos peligrosos en los volcanes activos se pueden agrupar en categorías representando una amenaza asociada específica para los elementos en riesgo, expuestos en los flancos del volcán y el área circundante.

Lo anterior es esencial para reducir el rango de incertidumbre para la toma de decisiones que afectan el futuro de una situación específica y las diferentes partes involucradas.

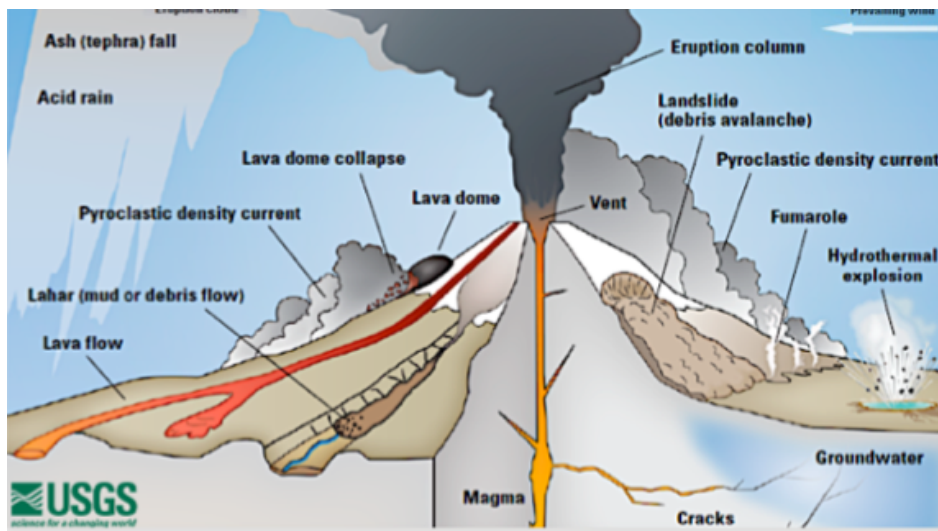


Figura 2. Fenómenos y amenazas volcánicas.

Durante una erupción volcánica, la calidad de los recursos naturales, como el aire, el suelo y el agua, en los ecosistemas de la zona de riesgo volcánico se ve alterada, principalmente por la emisión de gases y cenizas.

Los recursos que son afectados por el impacto de la emisión de estos materiales son: alteración de la calidad del aire, impacto en la calidad del agua, impacto en la calidad del suelo, impacto en la infraestructura pública.

Sin embargo, en muchos casos las erupciones volcánicas tienen una fase de advertencia mucho más larga antes del inicio de la erupción, y permiten alertar. Pero durar mucho más que otras amenazas naturales y generar más pérdidas y daños.

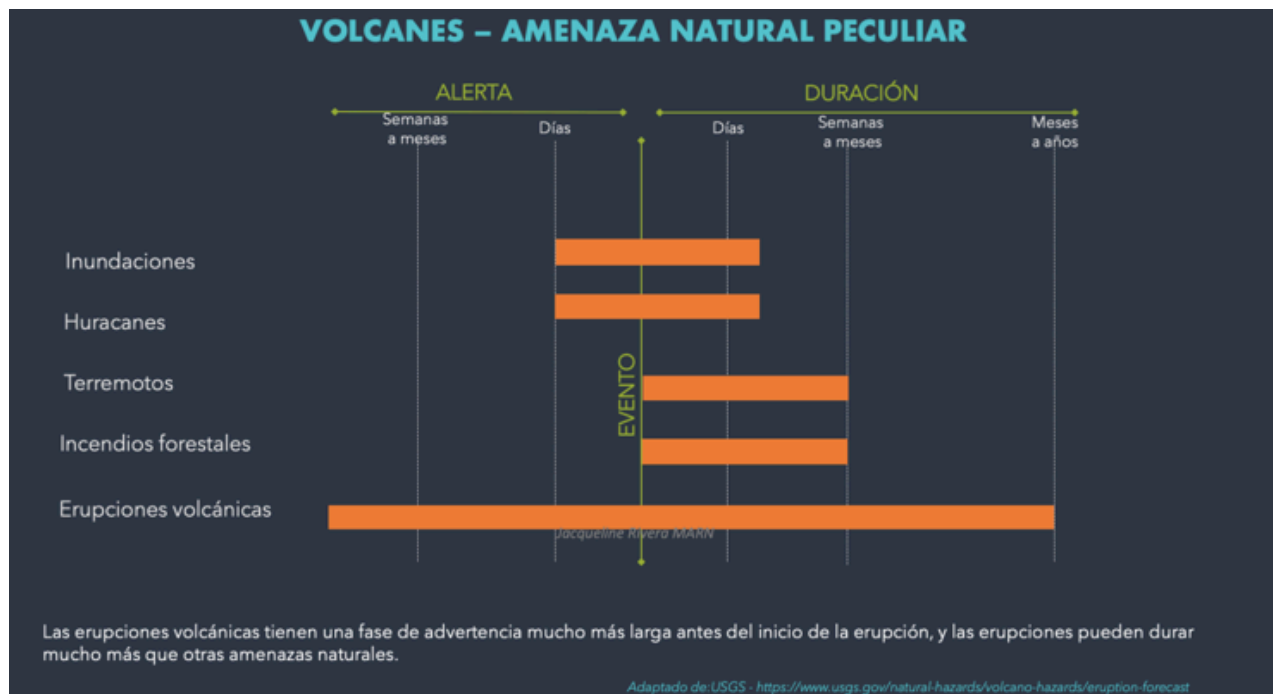


Figura 3. Periodos de alerta y duración de acuerdo a diferentes amenazas de origen natural.

Las preguntas importantes para pronosticar erupciones volcánicas incluyen:

¿habrá una erupción?, ¿qué tipo de erupción será?, ¿cómo comenzará la erupción?, ¿cuándo comenzará una erupción?, ¿cuánto durará una erupción?, ¿qué tipo de eventos se desarrollarán durante la erupción?

Para responder estas preguntas se desarrollan herramientas que ayudan a dar una respuesta y comprender cuál es el origen de la actividad, su clasificación, esta herramienta se denomina árbol de eventos. Y para comunicar adecuadamente a la población, se deben implementar enfoques como el de Pronósticos por Impacto.

Referencias bibliográficas

Árbol de eventos: adaptado de USGS-<https://www.usgs.gov/natural-hazards/volcano-hazards/eruption-forecast> Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales <https://marn.gob.sv/>

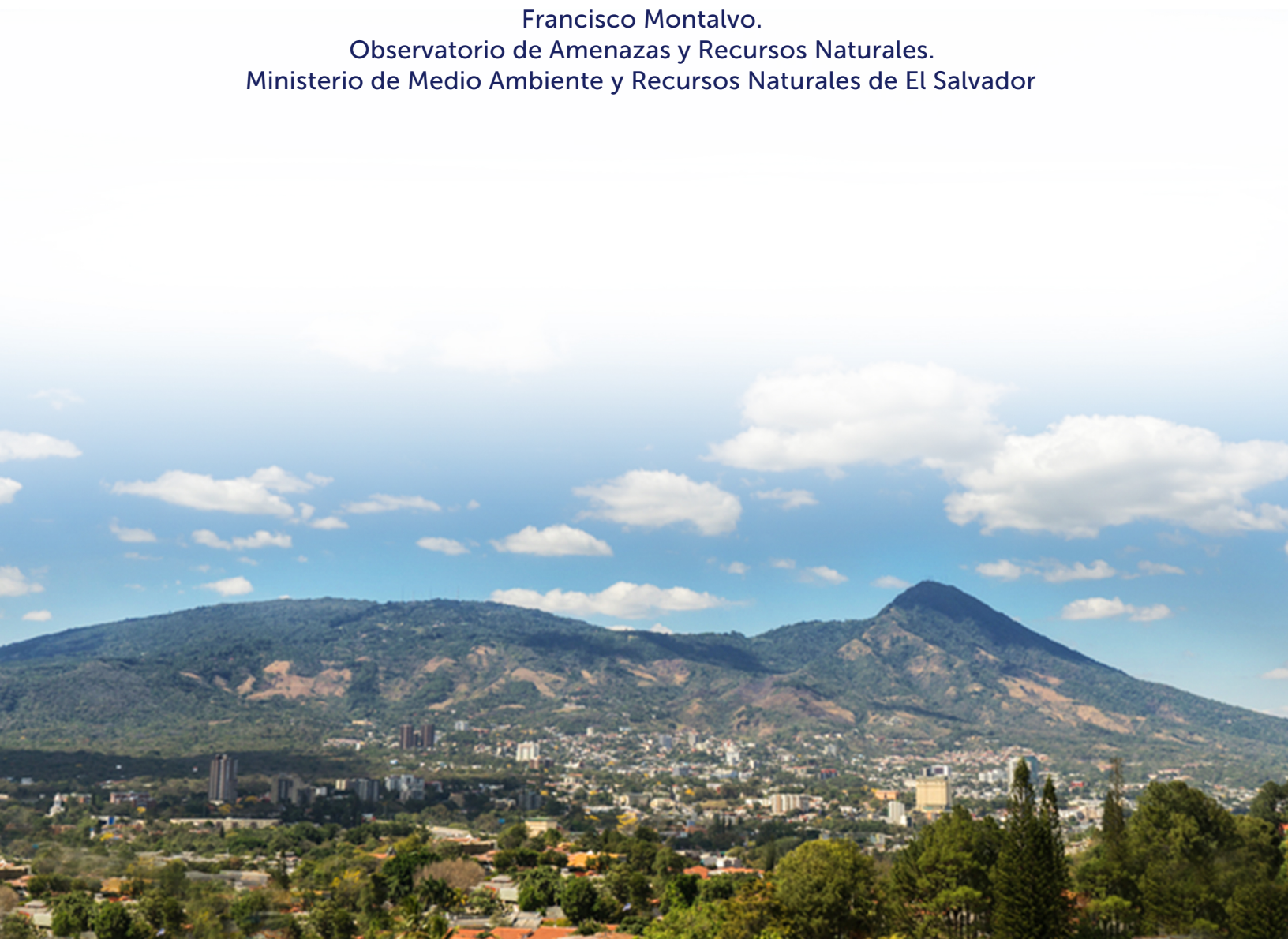
Capítulo IV.

Monitoreo Volcánico

Ponencia 26

Línea base de monitoreo geoquímico del CVSS.

Francisco Montalvo.
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador



Línea base del Monitoreo Geoquímico del Complejo Volcánico de San Salvador (CVSS)

Francisco Montalvo.
Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales.

Resumen

El conocimiento de la historia eruptiva de un volcán permite estimar su actividad futura y conocer los alcances y afectaciones que esta pueda tener sobre la sociedad. Un adecuado monitoreo de los parámetros indicadores de su actividad permite identificar comportamientos que podrían estar relacionados directamente con un periodo eruptivo.

Es importante monitorear continuamente parámetros como gases, sismicidad, temperatura y deformación durante el periodo de reposo de un volcán para determinar rangos de variación en los valores de estos parámetros que serán considerados como normales, y así poder definir un límite en los que ya no serían normales sino el reflejo del inicio de una etapa eruptiva.

Un ascenso magmático provocaría liberación de energía térmica, gases, sismicidad, liberación de especies químicas como sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, vapor de agua cloruro de hidrógeno, ácido clorhídrico, entre otros.

Como resultado de este monitoreo se establece la línea base que se define como un estado de normalidad de parámetros físicos y concentraciones de especies químicas, su importancia radica en que permite identificar rápidamente variaciones que podrían indicar el inicio de una etapa eruptiva y, de esta forma poder emitir una alerta temprana.

Para el Complejo Volcánico San Salvador (CVSS), se han establecido líneas o valores base de temperatura, gases y especies químicas claves que son liberadas durante el ascenso del magma hacia la superficie, estos valores son el resultado de un monitoreo constante que se ha llevado a cabo desde 2001 a través de muestreos de agua de pozos y manantiales, mediciones de temperatura, mediciones de gases y monitoreo sísmico.

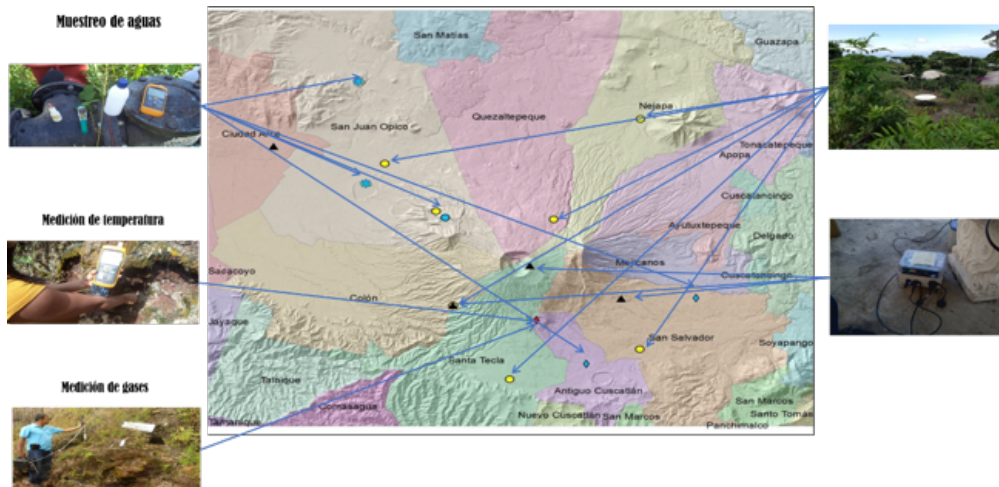


Figura 1. Ubicación de los lugares donde se realiza el monitoreo para el CVSS.

Los rangos de los valores considerados como línea base para los parámetros de temperatura, sulfato en aguas, cloruro en aguas se representan en diagramas de dispersión de puntos. En la Figura 2, se representan las mediciones de temperatura en pozos y manantiales revelan que el valor base se encuentra entre los 25 °C y 30 °C.

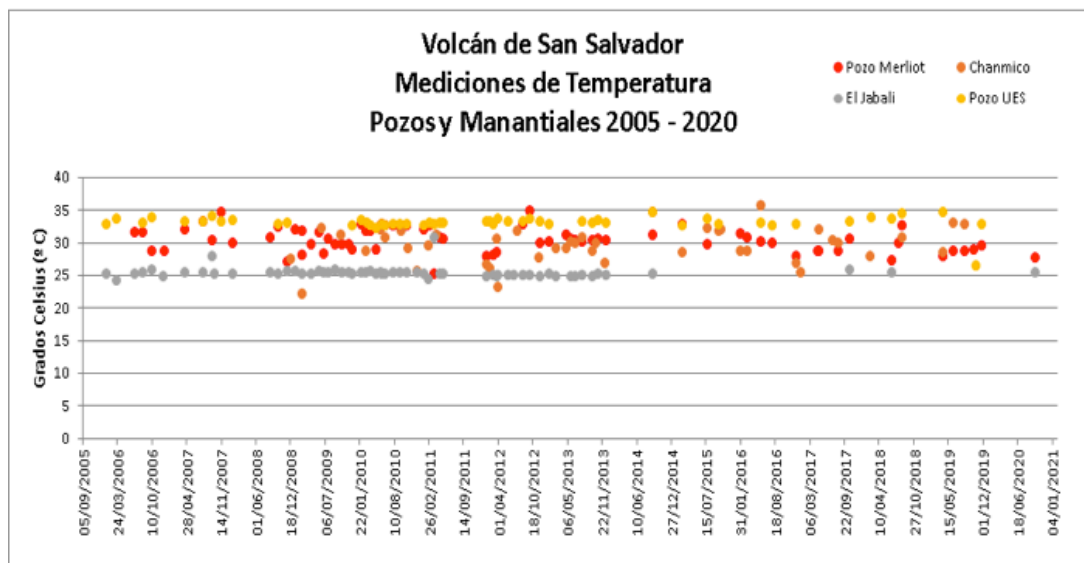


Figura 2. Gráficos que muestran las variaciones de temperatura en diferentes puntos de monitoreo del volcán San Salvador.

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

A continuación, se describen las principales características de los parámetros analizados en el monitoreo volcánico para el área del CVSS.

Las concentraciones de sulfatos se mantienen entre los rangos de 25 – 250 ppm, a excepción del pozo del jabalí donde los valores son más altos, probablemente por los abundantes cultivos en la zona.

Las mediciones de cloruros han permanecido estables y relativamente bajas para todos los lugares de medición entre los rangos de 10 – 75 ppm.

Las mediciones de temperatura tomadas en el campo fumarólico la Olla se han mantenido estables en el período 2004-2020 por lo que se estable la línea base de temperatura en 76 °C.

Las concentraciones de dióxido de azufre son bajas lo que indica que no hay sistema hidrotermal dominante, ni sistema magmático dominante.

Las concentraciones para el dióxido de carbono y dióxido de azufre se mantienen bajas, siendo típicos de un sistema calentado por remanentes caloríficos. Por anterior, se concluye que hasta la fecha no existen cambios que indiquen una reactivación del Volcán San Salvador.

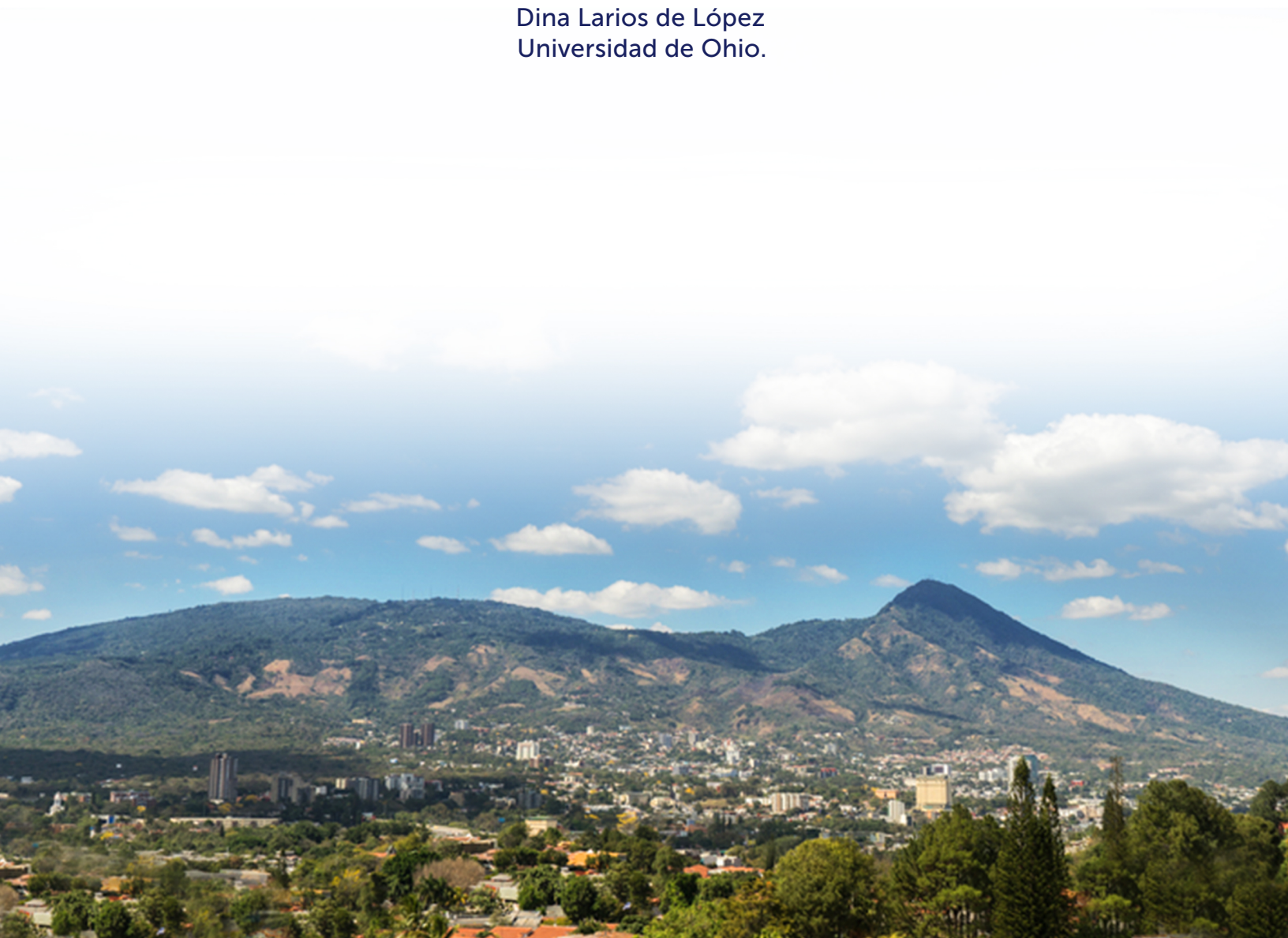
Capítulo IV.

Uso del suelo CVSS y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 27

Método de gases difusos aplicado a monitoreo volcánico.

Dina Larios de López
Universidad de Ohio.



Métodos de gases difusos para monitoreo volcánico

Dina Larios de López
Department of geological Sciences Ohio University

Resumen

Todos los sistemas volcánicos liberan gases a la atmosfera provenientes de la cámara magmática o un sistema hidrotermal, esta liberación tiene lugar de dos formas 1) por la chimenea principal o cráter a través de una pluma gases y 2) a través del suelo de los flancos del edificio volcánico y áreas cercanas al mismo

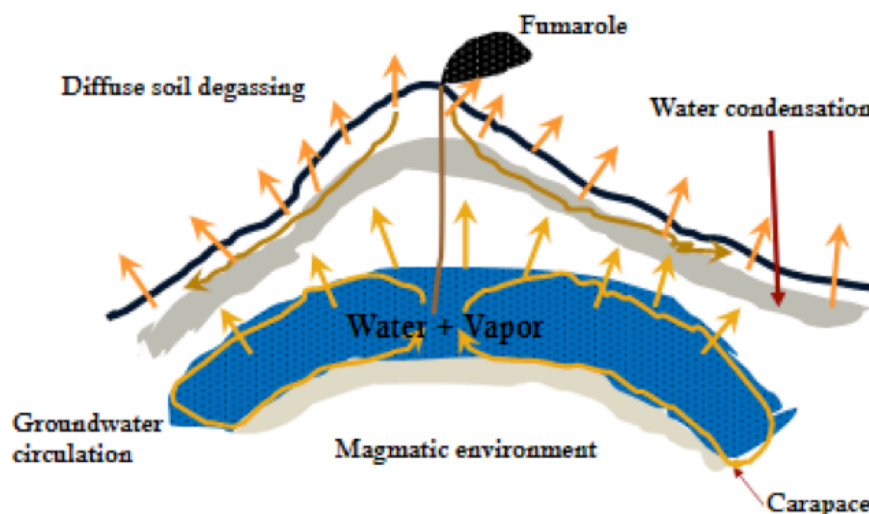


Figura 1. Esquema de la liberación de gases en un edificio volcánico.

De estos gases que son liberados el componente mayoritario es el vapor de agua que usualmente representa más del 90 % de la descarga total, así mismo, también son liberados gases secos siendo el más importante el CO_2 con un porcentaje a menudo del 90 % con respecto al volumen total.

Adicionalmente a estos gases también son liberados SO_2 y en menores concentraciones HC, HF, metano, N_2 , y radón (que es liberado por sistemas volcánicos e hidrotermales). El movimiento de los gases a través del suelo permite que estos se desplacen de zonas de mayor presión a zonas con menor presión, viéndose directamente afectado por la permeabilidad del mismo.

Para estudiar este desplazamiento, conocido como desgasificación, se utiliza el método de gases difusos que permite identificar y cuantificar las especies químicas gaseosas provenientes del sistema hidrotermal o de la cámara magmática que han alcanzado la superficie.

La importancia de este método radica en que permite conocer el estado del sistema volcánico y a la vez proporciona información sobre la permeabilidad del medio, razón por lo cual, no solo se utiliza para el estudio de volcanes, sino que también es aplicado en la exploración geotérmica, algunos de los gases que se miden son: CO_2 , Radón, mercurio, helio entre otros.

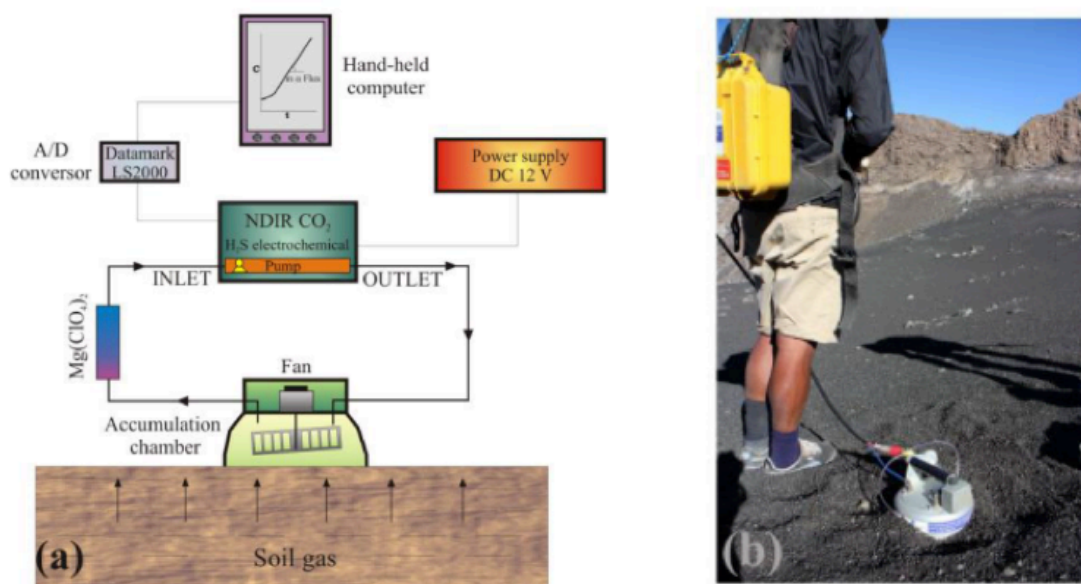


Figura 2. a) Esquema ilustrativo del funcionamiento del equipo para gases difusos; b) ejemplo de colocación del equipo.

Uno de los gases que se considera más interesante para mediciones difusas es el radón, un gas noble radiactivo inoloro, invisible, sin sabor que se produce de forma natural en las rocas y el suelo, por el decaimiento de los elementos torio y uranio, este puede relacionarse directamente con la ubicación de fallas, actividad sísmica y actividad volcánica.

En vista de la valiosa información que el estudio de gases difusos puede aportar en El Salvador, se ha llevado a cabo investigaciones en algunos de los principales volcanes y campos geotérmicos. Estudios realizados en los volcanes de San Salvador, San Miguel y la Caldera de Ilopango, a través de mediciones de CO_2 y ^{222}Rn , han permitido visualizar claramente anomalías originadas por el ascenso de gases a lo largo de fallamientos locales.

De igual forma estudios realizados en los campos geotérmicos de Ahuachapán y Berlín han permitido identificar zonas más permeables y por ende con mayor ascenso de gases, en el campo geotérmico de Berlín.

Adicionalmente, a estas vías de ascenso preferenciales se logró visualizar una estructura importante que podría asociarse al límite de la caldera.

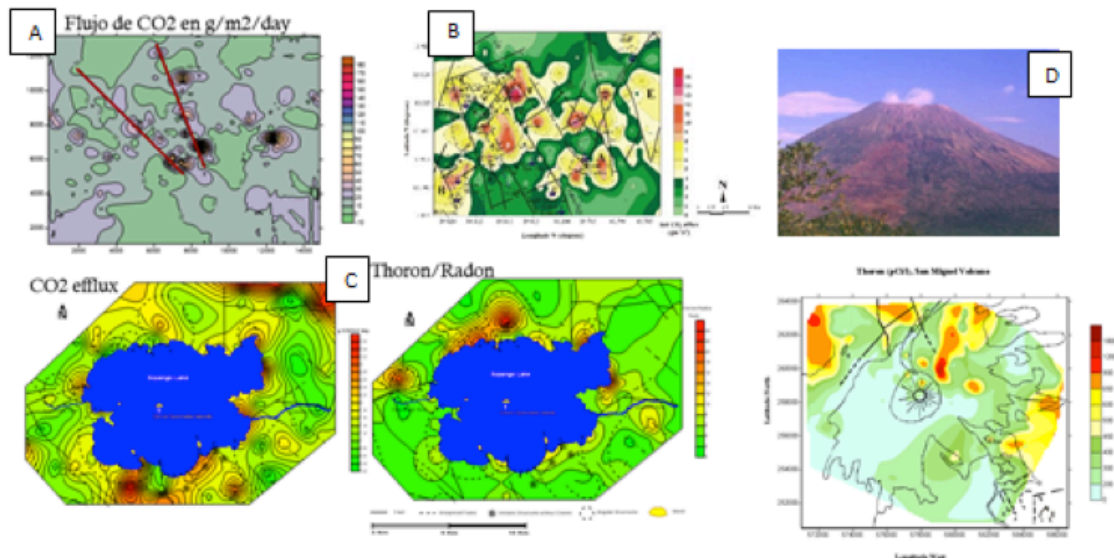


Figura 3. Mapa de flujo de CO_2 , Torón Radón en Complejo Volcánico de San Salvador.

Nota: A) Mapa 2D de flujo de CO_2 para el volcán de San Salvador se visualiza como las anomalías se orientan sobre el fallamiento en dirección NO-SE. B) Resultados para flujo de CO_2 en el campo geotérmico de Ahuachapán. C) Resultados obtenidos mediante gases difusos para la caldera de Ilopango, se muestran anomalías bien focalizadas que indican zonas más permeables del suelo con tendencias NO-SE. D) Mapa de flujo de torón para el Volcán de San Miguel, se puede observar en el flanco N una zona anómala relacionada con una falla en el edificio volcánico.

La distribución espacial de la emanación de gases en el suelo proporciona información sobre aquellas zonas de un edificio volcánico que son más permeables y a través de las cuales tiene lugar el ascenso de los gases, ayudando a identificar zonas con mayores alteraciones hidrotermales y más susceptibles a deslizamientos.

Así mismo, la desgasificación difusa puede brindar información sobre cambios en el sistema magmático y ser una herramienta útil para monitoreo volcánico en forma espacial y temporal.

Referencias bibliográficas

- Cartagena, R., Olmos, R., López, D.L., Soriano, T., Barahona, F., Hernández, P. and Perez, N., 2004. Diffuse soil degassing of carbon dioxide, radon, and mercury at San Miguel Volcano, El Salvador. Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J. editors, Geological Society of America Special Paper No. 375 "Natural Hazards in El Salvador", pp. 203-212.
- Chiodini, G., Cioni, R., Marini, L., Panichi C., Origin of the fumarolic fluids of Vulcano Island, Italy and implications for volcanic surveillance. Bulletin of Volcanology 57, 99-110 (1995) <https://doi.org/10.1007/BF00301400>.
- Faure G (1986) Principles of Isotope Geology (2nd edn). Wiley, New York, 589 p.
- Fu, C.C., Yang, T.F., Walia, V., Chen, C.H., Reconnaissance of soil gas composition over the buried fault and fracture zone in southern Taiwan. Geochemical Journal, 39, 427-439 (2005) <https://doi.org/10.2343/geochemj.39.427>

Javoy, M., Pineau, f., Delorme H., Carbona and nitrogen isotopes in the mantle, Chemical Geology, Vol 57, 21, 41 - 62 [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90093-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90093-8)

Lopez D.L., Ransom, L., Perez, N., Hernandez, P. and Monterrosa, J., 2004. Dynamics of diffuse degassing at Ilopango Caldera, El Salvador. Rose, W.I., Bommer, J.J., López, D.L., Carr, M.J., and Major, J.J. editors, Geological Society of America Special Paper No. 375 "Natural Hazards in El Salvador", pp. 191-202
López, D.L., Ransom, L., Monterrosa, J., Soriano, T., Barahona, F., Olmos, R., and Bundschuh, J., 2009. Volcanic arsenic and boron pollution of Ilopango Lake, El Salvador. In Natural Arsenic in Groundwater of Latin America, J. Bundschuh, Armienta, M., Birkle, P., Bhattacharya, P., Matschullat, J., A. B Mukherjee, A.B. editors, Taylor & Francis, p. 129-143.

Magaña, M. I., López, D., Barrios, L.A., Perez, N. M., Padrón, E. and Henriquez, E., 2004: Diffuse and convective degassing of soil gases and heat at the TR-6-Zapotillo hydrothermal discharge zone, Berlin Geothermal Field, El Salvador. Geothermal Resources Council, Trans. 28, 485-488 (2004).

Marty B., Jambon, A., C³He in volatile fluxes from the solid Earth: implications for carbon geodynamics. Vol 83, Issues 1-4, 16-26 (1987) [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(87\)90047-1](https://doi.org/10.1016/0012-821X(87)90047-1)

Perez M.N. Hernandez P.A., Padrón, E., Cartagena, R. Olmos, R. Barahona, F., y otros. Anomalous diffuse CO₂ emission prior to January 2002 short-term unrest at San Miguel Volcans, El Salvador, Central America.

Pérez, N.M., Salazar J.M., Hernandez P., Diffuse CO₂ and Rn ²²² degassing from San Salvador Volcano, Central America. Geological Society of America, 10, 227-237.

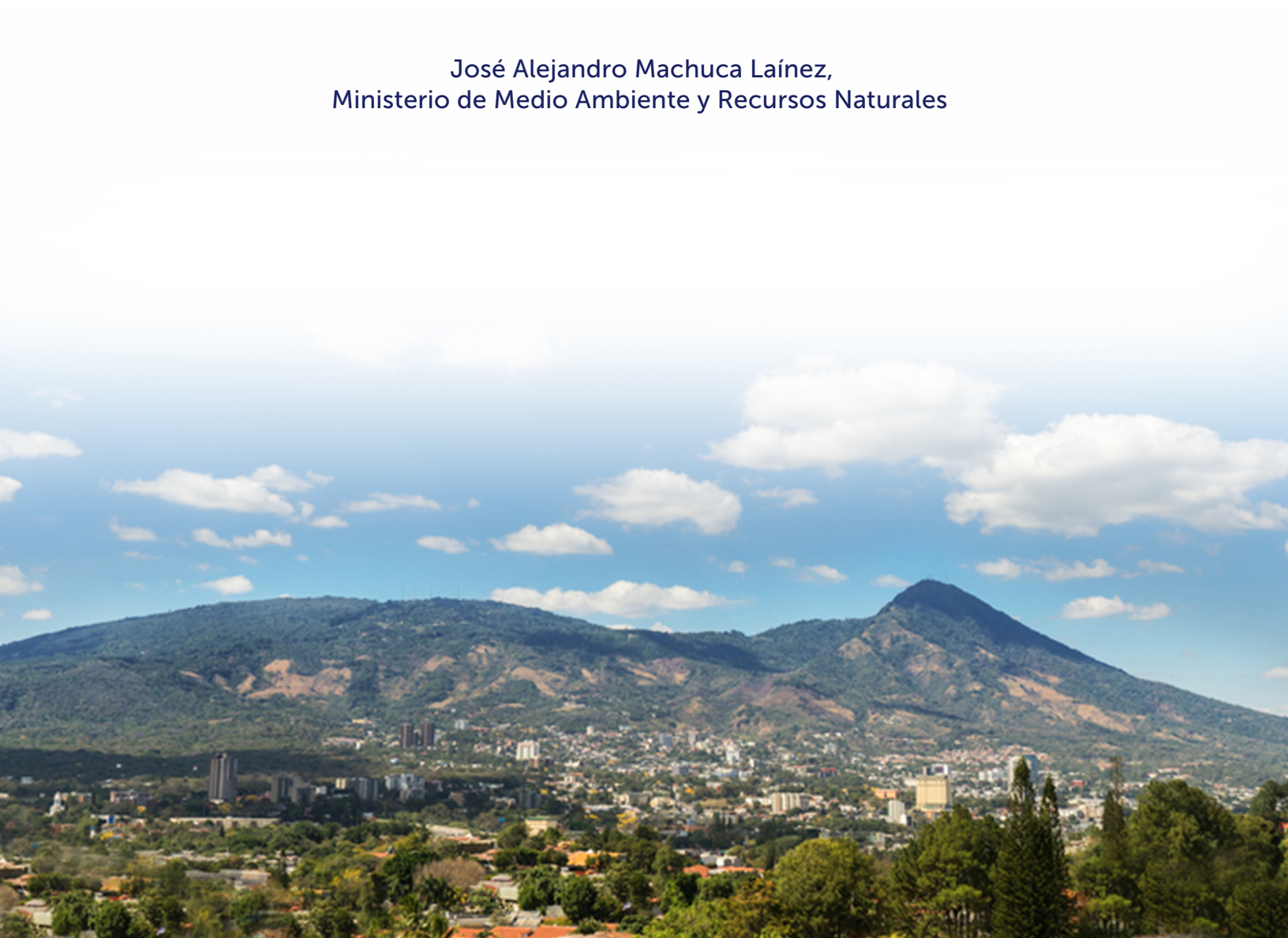
Capítulo V.

Uso del suelo CVSS y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 28

Ordenamiento ambiental, uso del suelo en el CVSS y reconocimiento de usos de suelo para los procesos de zonificación ambiental.

José Alejandro Machuca Laínez,
Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales



Ordenamiento ambiental, uso del suelo en el CVSS y reconocimiento de usos de suelo para los procesos de zonificación ambiental.

Alejandro Machuca.
Gerencia de ordenamiento ambiental, MARN.

Resumen

El ordenamiento ambiental no solo en el volcán de San Salvador sino también en todo el país parte de los mandatos jurídicos. El artículo 50 de la Ley del Medio Ambiente, en el cual se establece que el ministerio es la institución que elaborará las directrices para la zonificación ambiental y, los usos del suelo; y el gobierno central y los municipios están obligados a cumplir las directrices de zonificación al emitir los permisos y regulaciones.

Las directrices en la zonificación ambiental se establecen en el artículo 71 del Reglamento General de la Ley de Medio Ambiente y en el artículo 72 del mismo Reglamento se establece dónde debe considerarse la zonificación ambiental como parte del ordenamiento territorial.

El alcance de la zonificación, tiene como punto de partida una línea base cartográfica para la gestión ambiental, donde se delimita las zonas y categorías de ordenamiento, se identifican las diferencias entre permisividad y restricciones y, se realizan análisis de condiciones inherentes al territorio.

En el marco de actuación, se establecen los permisos, prohibiciones y restricciones lo cual ayuda a responder tres preguntas claves ¿Qué puedo hacer? ¿Dónde? ¿Cómo? Las cuales tienen dos niveles de respuesta, el primer nivel es el ordenamiento a escala municipal y regional y su instrumento de gestión es la zonificación ambiental; y el segundo nivel es la evaluación de impacto y su instrumento de gestión es la categorización de proyectos.

El procedimiento metodológico para la zonificación ambiental es: realizar un plan de trabajo donde se recopila información, se identifican actores claves, y se programan trabajo de campo para validar el mapa de uso de suelos. Realizar un diagnóstico ambiental que cuente con los componentes físicos, hidrológicos e hidrogeológicos, ecológicos, socio económico y el mapa de usos de suelo.

A partir de lo anterior, se establecen las directrices de zonificación ambiental. Se realizan los lineamientos de actuación donde se socializa con los actores locales y se integran criterios propuestos.

Esto se materializa en un documento técnico con mapas de zonificación ambiental y sus directrices, al cual se le llama Atlas y todo esto se legaliza mediante el decreto ejecutivo, el cual es la etapa final del proceso.

Desde el 2020, está en vigencia la Ley de procedimiento administrativos y la ley de mejora regulatoria que nos lleva a un proceso de consulta pública más extensos que en años anteriores.

Los documentos que conforman las directrices para la zonificación ambiental y los usos del suelo son el decreto ejecutivo, publicación en el Diario Oficial, el anexo técnico que conlleva el mapa de zonificación ambiental, lineamientos de actuación y consideraciones generales.

Actualización de la zonificación ambiental de los ecosistemas del volcán de San Salvador.

Para la actualización de zonificación que se hará la determinación de área de análisis teniendo en cuenta áreas frágiles, áreas naturales protegidas, región de influencia, perímetro establecido por la medida cautelar, relación del VSS con el río Colón y el río Sucio (sector E y NE). El ecosistema volcán de San Salvador considerará los

municipios de San Salvador, Antiguo Cuscatlán, Santa Tecla, Ciudad Arce, San Juan Opico, Quezaltepeque, Nejapa, Apopa, Ayutuxtepeque y Mejicanos.

Los insumos que se necesitarán para el proceso de la zonificación será el mapa de uso de suelos actualizado, zonas de protección, áreas frágiles (pendientes mayores a 30 grados), recarga hídrica, mapa de amenazas como lahares o flujos de escombros, susceptibilidad a deslizamientos, inundación y amenazas volcánicas.

Un nuevo tema que se incluirá es el factor de naturalidad el cual consiste en una estimación del factor de Naturalidad medio, mediante una valoración ponderada de los diferentes usos del suelo reconocidos para el área de estudio.

También se incluirán los corredores biológicos donde se considera que si existe un hábitat y hay una fragmentación debe de haber un paso preferente entre esos espacios verdes, para que las especies puedan transitar y no impedir el tránsito de especie.

Para ello se realiza análisis cartográfico a partir del método de conductividad estructural, que consiste en indicar cuál es el costo menor para circular de un espacio verde hacia otro, con esto se obtiene resultado de redes de conductividad, este modelo cartográfico se puede validar con visita de campo en la zona de estudio.

Capítulo V.

Uso del suelo CVSS Y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 29

Bases conceptuales de Geoconservación.

Geólogo Mauricio Blanco.
Corporación Geopatrimonio Colombia



Bases conceptuales de Geoconservación.

Geólogo Mauricio Blanco.
Corporación Geopatrimonio Colombia

Resumen

La geología nace como una ciencia aplicada por la Revolución Industrial, debido a que se necesitó encontrar nuevos recursos minerales especialmente carbón y hierro para hacer los ferrocarriles, las carreteras en la época conocida como industrialización. La conservación durante esta época no era prioridad ni para los científicos ni para la sociedad sin algún compromiso con el medio ambiente.

Algunas de las épocas importantes de mencionar fue la conocida época de la fiebre del oro, en donde solo se hacía extracción del recurso sin prevención o cuidado al medio ambiente.

Solo a partir de 1803, algunos científicos comienzan a sensibilizar las temáticas de conversación. Por ejemplo, Emerson Waldo Ralph afirmó: "A los hombres les encanta maravillarse. Esto es la semilla de las ciencias"; Henry David expresó: "Fui a los bosques porque quería vivir deliberadamente, enfrentándome únicamente a los hechos esenciales de la vida, para ver si aprendía algo de ello y de esta forma no llegar a descubrir antes de morir que nunca había vivido". Las anteriores expresiones sentaron las bases de la relación hombre-naturaleza.

Por otro lado, Perkins (1864) publicó un libro titulado el Hombre y la Naturaleza enfatiza una importante reflexión: "La degradación ambiental es causa suficiente para causar el colapso de una civilización" y, es necesario mantener algunas zonas libres de transformación humana, como reservas de vida y paisajes intactos. En este escenario, Perkins propone el uso de estos lugares como parques públicos.

Para el mismo tiempo, Ferdinand naturalista y filósofo norteamericano pintaba escenarios naturales como el geiser de Yellowstone, en donde concluyó que era un espacio de interés paisajístico y que debería usarse como museo.

De hecho, el parque Yellowstone fue uno de los primeros Parques Nacionales declarado para el beneficio y disfrute de la gente en (1872), como lema en su placa de bienvenida. Este es un parque que no se hubiera dado sin estas reflexiones, tiene un área aproximada de 9000 m².

Otro de los filósofos que contribuyeron en la definición de los primeros parques nacionales fue Jhon Muir en 1903. Un campamento con el presidente Roosevelt en el hoy conocido como Parque Natural Yosemite que se maravilló con estos lugares, declarando durante su gestión numerosos sitios de reserva naturales.

La importancia de estos espacios naturales constituye un símbolo de identidad con la tierra y, aquí es donde la geología no solo está presente en estos escenarios, sino que también es protagonista referenciada Perkins (1864).

A nivel mundial el contexto en relación con la geoconservación se hizo el primer simposio internacional de patrimonio geológico en 1991, y se creó la primera red de geoparques de la UNESCO en el 2001.

Por su parte, en Colombia, se declaró en 1960 la cueva de los Guácharos que es uno de los complejos de cavernas de caliza en el departamento del Huila, con el cual se creó la dirección general de parques naturales, pero en relación a lo que es patrimonio en relación a la geología se hace a nivel internacional en el año 2004, la primera conferencia internacional de geoparques.

La corporación geopatrimonio nace en 2014 y en Colombia se tramita el decreto de patrimonio geológico y paleontológico, que finalmente se establece en el decreto 1356, que puede servir de referencia a los países interesados en promover el patrimonio geológico.

En el año 2017, nace la red de geoparques de América Latina (GeoLAC), de la cual se puede pertenecer una vez se establezca en el país un geoparque.

Hasta el momento se han creado 155 geoparques globales de la UNESCO, en más de 41 países, cinco en América latina, en Colombia se empieza a gestionar un geoparque en un ambiente volcánico.

De esta manera entonces se habla que la geología no solamente es una ciencia para extraer sino también que tiene otras disciplinas, como la Geodiversidad, Geopatrimonio, Geoconservación, Geoparques, Geoturismo y se constituyen en las 5G de la geología.

- **Geopatrimonio:** conjunto de elementos geológicos que tiene un valor científico, educativo, y/o turístico que merecen ser conservados para futuras generaciones.
- **Geodiversidad:** gran variedad de elementos geológicos (rocas, minerales, fósiles, suelos, formas de relieve, formaciones geológicas y paisaje)- independiente de su valor patrimonial, se hallan en un territorio y representan una historia geológica.
- **Geoconservación:** Actuaciones concretas sobre los lugares de interés geológico para su conservación.
- **Geoparques o parque geológico:** territorios con iniciativas de geoconservación y divulgación que favorecen el desarrollo local a partir del patrimonio geológico (puede tener además importancia ecológica, arqueológica y sociocultural).
- **Geoturismo:** turismo en aquellos lugares de interés geológico, orientado a su divulgación, apreciación, disfrute y aprendizaje.

Los lugares de interés geológico son sitios que representan muy bien la geología de la región o un proceso de formación geológica, como es en el caso de los volcanes.

En el Salvador se tiene la iniciativa de visualizar el volcán de San Salvador como un lugar de interés geológico. Todo esto necesita ser gestionado para poderlo conservar, para hacer la gestión es necesario tener un inventario de estos lugares mediante cartografía y estudios, es necesario hacer una legislación; asimismo, un plan de divulgación y un conjunto de acciones enfocadas en la preservación permitiendo así que las generaciones futuras puedan disfrutarlo y aprovechar todo el potencial promoviendo el desarrollo sostenible.

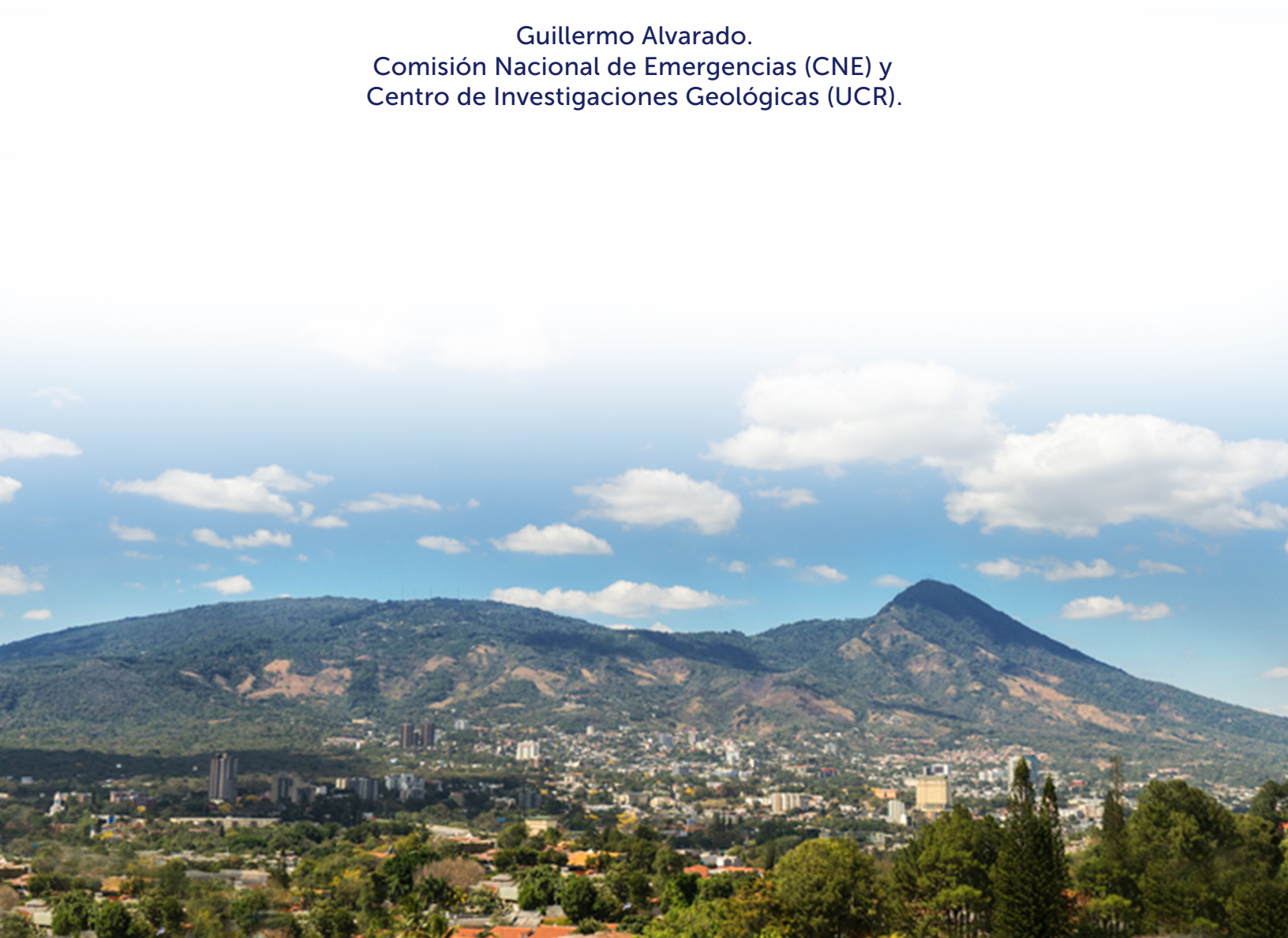
Capítulo V.

Uso del suelo CVSS y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 30

Mejoras en la gestión del riesgo volcánico en regiones geoturísticas: el caso de Costa Rica y su posible extrapolación a otros países de la región.

Guillermo Alvarado.
Comisión Nacional de Emergencias (CNE) y
Centro de Investigaciones Geológicas (UCR).



Mejoras en la gestión del riesgo volcánico en regiones geoturísticas: el caso de Costa Rica y su posible extrapolación a otros países de la región.

**Guillermo Alvarado
(CICG y CNE Costa Rica)**

Resumen

Dentro de los aspectos más relevantes dentro del ámbito turístico son: oferta turística, la cual es el conjunto de servicios puesto efectivamente en el mercado; y la demanda turística o el conjunto de servicios, efectivamente solicitados por el consumidor.

La infraestructura es un componente indispensable del patrimonio turístico de una nación. Está constituido por el conjunto de servicios básicos proveídos para satisfacer a toda la colectividad un país o región, comprende acueductos, energía, comunicaciones, drenajes, sanidad, seguridad, educación, sistema de transportes, obras urbanas.

Dentro del turismo hay varios tipos de los cuales se desarrollan diversas actividades dependiendo el rubro al cual pertenezca, dentro de los cuales tenemos: turismo de naturaleza suave, turismo de naturaleza fuerte, ecoturismo, geoturismo, agroturismo, turismo rural, turismo cultural, turismo gastronómico, turismo histórico, turismo de aventura y de salud.

Pero en adición a lo anterior, la mejora en la gestión de los riesgos volcánicos para disminuir la vulnerabilidad es muy importante y, más cuando hay turismo dentro de ellos.

¿Qué les pueden ofrecer los volcanes a los turistas?

Los volcanes ofrecen a los turistas paisajes, espectáculos de actividad volcánica, sitios arqueológicos, museos, termalismo, tecnología, geohistoria, geología, aguas termales, áreas de montañismo y de esquí acuático, lagos, ríos, cascadas, cañones, turismo de aventura y ecológico, cavernas volcánicas, gastronomía, beneficios de café, ingenios de caña de azúcar, trapiches y cultivos.

Sin duda alguna, los volcanes ofrecen una variedad de beneficios a los visitantes y locales de la región.

Los volcanes aportan, además, energía geotérmica, que es aprovechada en la región para generación de electricidad y, por ende, tecnología y desarrollo de energías limpias, que igualmente sorprenden a los turistas.

Hay muchos beneficios que los volcanes pueden dar, pero también hay que tener presente que hay una vulnerabilidad a partir del peligro que la actividad de un volcán implica, dado que, si ocurre un accidente debido a que indebidamente se pasaran ciertas recomendaciones, el turismo puede decaer y, por ende, la economía de un lugar.

En Centroamérica, uno de los países con mejores rutas hasta la cima de volcanes es Costa Rica, seguido por El Salvador, en los cuales se puede ascender hasta el cráter de los volcanes en vehículo, lo cual es un punto a favor para el turismo por la accesibilidad a los sitios, en el caso de Costa Rica el volcán Irazú fue uno de los primeros destinos turísticos de volcanes activos en Latinoamérica.

Gestión de riesgo

Se entiende como aquel proceso mediante el cual se revierten positivamente las condiciones de vulnerabilidad de la población, la infraestructura, así como, de las líneas vitales, las actividades productivas de bienes y servicios y el ambiente. Por ende, la gestión del riesgo consiste en el enfoque sistemático y la práctica de manejar la incertidumbre para minimizar los posibles daños y pérdidas.

Debe ser ampliamente practicada por los entes gubernamentales y privados, así como las organizaciones, para minimizar el riesgo en la toma de decisiones en los proyectos de inversión, bien social, planificación, entre muchos otros.

La reglamentación del uso del suelo

En 2001 (La Gaceta, 11 de enero, Costa Rica), apareció el reglamento “Uso de suelos en los alrededores del Volcán Arenal”, y “Restricciones para el uso del suelo en los alrededores del Volcán Arenal” suscritos por CNE, uno de los primeros países en el mundo en hacerlo.

Estas reglamentaciones nacen por el hecho de la peligrosidad de algunas zonas volcánicas donde turistas han perdido la vida, restringiendo así zonas de alto peligro y, generando límites en los cuales ellos pueden tener acceso, así como, evitando el desarrollo de infraestructura con población permanente cerca de volcanes peligrosos.

Mejoras en la gestión del riesgo en parques volcánicos en Costa Rica.

En parques turísticos volcánicos se han construido algunas estructuras a manera de búnker, para que actúen como protección en caso de actividades volcánicas explosivas, ofreciendo mayor seguridad al turista ante balísticos volcánicos.

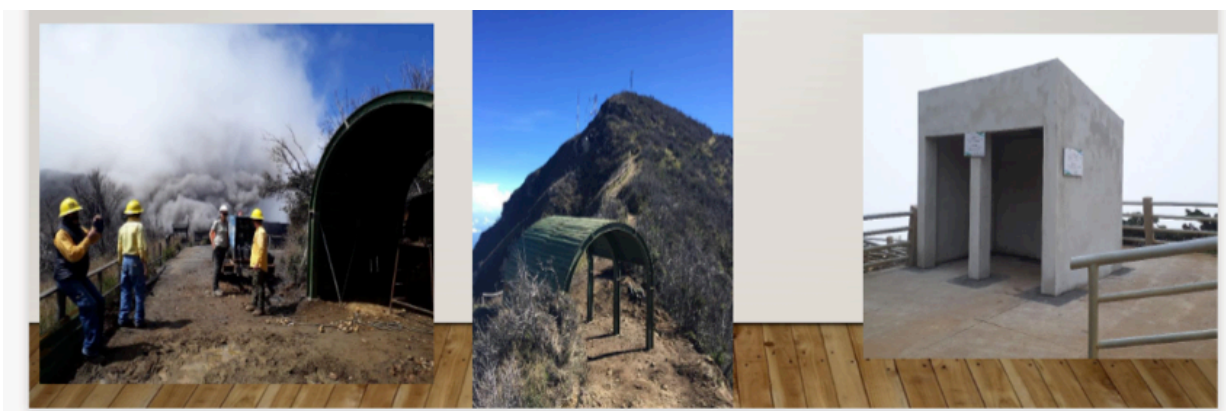


Figura 1. Búnkeres de protección de balísticos volcánicos.

También hay rotulación preventiva y de advertencias de zonas de peligro en el lugar, dando a conocer sobre los fenómenos intrínsecos, que ocurren en el volcán al turista.

Al limitar el número de personas que pueden ingresar al cráter del volcán, se logra una visita ordenada y segura con un mejor control del flujo y cantidad de personas en los puntos de peligrosidad y, así, se disminuye el número de personas expuestas. Existen sistemas de alarmas que indican casos anómalos en actividades repentinas del volcán.

Además de todas estas medidas preventivas, se han puesto al público pancartas informativas sobre datos del lugar en el que se encuentran y, de esta manera, la población turista se informa de la historia y naturaleza del volcán, entre otros datos de importancia. Ese tipo de rotulación que versa con la geología, tipos de peligros y geohistoria, se denominan rótulos informativos, que se han confeccionado tanto en español como en inglés.



Figura 2. Rotulación preventiva y advertencias en el volcán.

Existen reglas para seguir y sobrevivir explorando volcanes como conozca antes de ir y lleve el equipo adecuado en función del volcán, así como, para sobrevivir una actividad volcánica, como manténgase fuera del alcance los proyectiles volcánicos, caída de ceniza, tener una ruta o plan de escape, manténgase fuera del alcance de gases volcánicos y depresiones, tener cuidado con explosiones secundarias que pueden ocurrir en: cuevas volcánicas con metano, explosiones de coladas de lava y flujos piroclásticos al contacto con agua superficial, explosiones de metano al contacto de coladas de lava y flujos piroclásticos con la vegetación.

Para la gestión del riesgo volcánico dentro del turismo, en particular, resulta importante: a) conocer la historia eruptiva, b) evaluar la amenaza potencial, c) hacer el seguimiento continuo (vigilancia o monitoreo volcánico), d) diagnosticar sobre el estado de actividad del volcán y, e) socializar y comunicar.



Figura 3. Ejemplo de rotulación informativa de los volcanes.

Referencias bibliográficas

- Bundschuh, J., Birkle, P., Finch, R.C., Day, M., Romero, J., Paniagua, S., Alvarado, G.E., Bhattacharya, B., Tippmann, K. & Chaves, D., 2007. Geology-related tourism for sustainable development. En: J. Bundschuh & G.E. Alvarado (eds.): Central America: Geology, Resources and Hazards. Taylor & Francis, Londres/ London. 2: 1015-1098.
- Alvarado, G. E., Esquivel, L. y Sánchez, B. (2021). Mejoras en el paradigma del manejo de la gestión del riesgo en los parques nacionales volcánicos de Costa Rica, entre el año 2000 y 2020. *Rev. Geol. Amér. Central*, 64, 1-15.

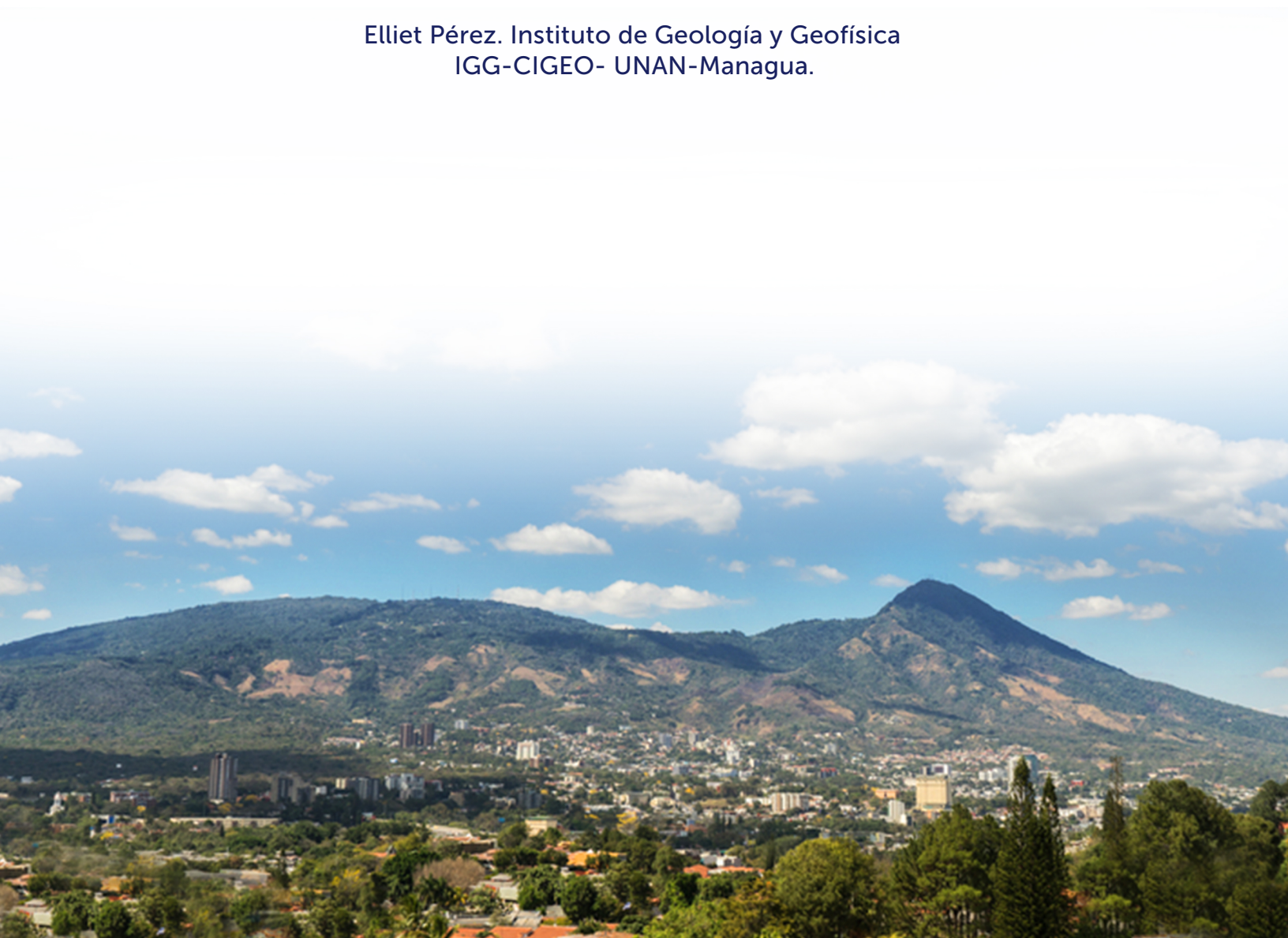
Capítulo V.

Uso del suelo CVSS y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 31

Aspectos geológicos relevantes para el desarrollo del “Geoparque Río Coco”, Madriz, al norte de Nicaragua, en Centroamérica.

Elliet Pérez. Instituto de Geología y Geofísica
IGG-CIGEO- UNAN-Managua.



Aspectos geológicos relevantes del “Geoparque Río Coco”, Madriz al norte de Nicaragua, en Centroamérica.

Elliet Pérez. IGG – CIGEO/ UNAN- Managua.

Resumen

El estudio del patrimonio geológico surge de la necesidad de la conservación y aumento del valor de la tierra, sus paisajes y formaciones geológicas, testigos claves de la historia de nuestro planeta. La UNESCO es la promotora de los territorios o parques naturales con características geológicas especiales, mejor conocidos como Geoparque. Un Geoparque es un área geográfica donde los sitios de patrimonio geológico forman parte de un concepto integral de protección, educación y desarrollo sostenible, además, representa un gran potencial para la protección del patrimonio natural y cultural local, el desarrollo basado en el geoturismo, agricultura ecológica, artesanía, educación, cocina local e identidad indígena (Pásková, 2014)

El 7 de julio del 2020 la UNESCO aprobó la incorporación del Geoparque Río Coco a la Red Mundial de Geoparques durante la sesión 209 del Consejo Ejecutivo (Consejo de Educación y Ciudadanía, 2020). Con esta aprobación el Geoparque Río Coco se convirtió en el primero de Centroamérica y el octavo en América Latina que recibe tan importante nominación. Este acontecimiento motivó al IGG-CIGEO de la UNAN-Managua, en conjunto con el Servicio Geológico Checo (SGC), a trabajar para ampliar el conocimiento geológico y dar a conocer el valor geológico de la región.

Geoparque Río Coco

El Geoparque Río Coco se encuentra en la región noroeste de Nicaragua, en el departamento de Madriz, a más de 220 km de la capital Managua, tiene un área aproximada de 954 y abarca a los municipios de Somoto, Totogalpa, San

Lucas, Las Sábanas y San José de Cusmapa. El Geoparque está constituido por 19 geositios denominados por su características geológicas, morfológicas, paisajísticas, valor arqueológico, conocimiento local e indígena, geoconservación, desarrollo sostenible y riesgos geológicos.

La geología del territorio del Geoparque Río Coco requiere del conocimiento de la geología histórica de Nicaragua, que inició durante la era Paleozoica y culminó con la intensa actividad volcánica del Cuaternario. El Geoparque Río Coco expone las rocas más antiguas de Nicaragua, con una corteza de tipo continental asentada sobre rocas metamórficas conocidas como Esquistos de Nueva Segovia, de edad Paleozoico Superior, sobre las que yacen rocas sedimentarias del Paleozoico Inferior, Mesozoico y Terciario, intruidas por las rocas plutónicas del Batolito de Dipilto, de edad Cretácica. En el Geoparque se exponen pequeños cuerpos aislados de granitos de grano medio en las cercanías del geositio Minas de Cuje. Las rocas sedimentarias están representadas por la Formación Totogalpa con edad desde el Oligoceno hasta el Mioceno Medio; el tipo de roca predominante es conglomerado de cuarzo rojo expuesto al norte y este del territorio Geoparque formando una franja con un rumbo NO-SE, originando los geositios: Tres Señoritas, Cerro El Jiñote, El Krike y Poza La Muta. Las rocas volcánicas de edad Neógeno cubren una gran extensión del Geoparque y sus alrededores, formando los Grupos Somoto y Matagalpa, con los geositios: Cañón de Somoto, Cañón Seco, Piedras Pintadas, Aguas Calientes, La Rueda y Mangas Verdes. La Cubierta Cuaternaria está constituida por acumulaciones fluviales que se consideran de edad Pleistoceno; forman varios horizontes de paleoterrazas o sus restos, constituidas por grava o grava arenosa (UNAN-Managua, 2021).

La tectónica está compuesta por estructuras escarpadas frágiles e irregulares, los sistemas de fallas visibles presentan tres patrones de dirección preferencial NO-SE, N-S y NE-SO. El relieve es dinámico, montañoso, con grandes diferencias de altitud; sus accidentes geográficos se caracterizan por pendientes pronunciadas, superficies de planicies, depresiones tectónicamente predispuestas, amplios valles de erosión y cañones (UNAN-Managua, 2021).

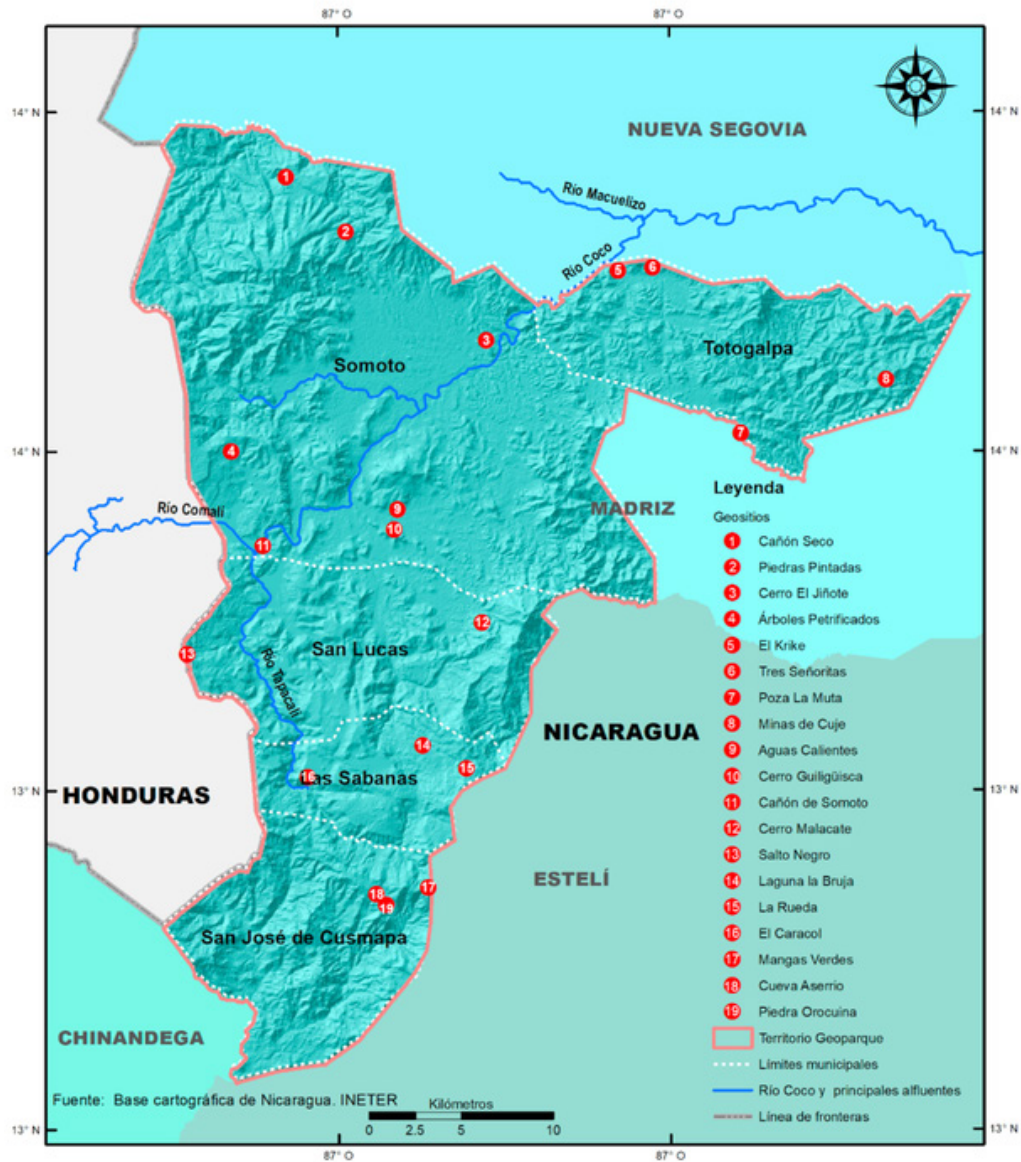


Figura 1. Mapa de ubicación de Geositos del Geoparque Río coco. Imagen tomada del Libro de Geología del Geoparque Río Coco, 2da. edición 2021 (UNAN-Managua, 2021).

La memoria recopila extractos de la información suministrada por los autores de cada ponencia del Seminario virtual Volcán de San Salvador, *más que majestuoso, un volcán enigmático*.

A continuación, se describirá el Geositio Cañón de Somoto, Geositio Piedras Pintadas y Tres Señoritas:

Cañón de Somoto

El Gran Cañón de Somoto se localiza entre los poblados de El Espino, Las Papayas, Valle Sonís y El Guayabo, a unos 13 kilómetros al oeste de la ciudad de Somoto, cabecera departamental del departamento de Madriz, tiene una longitud total de 5400 m y a través de él corren las aguas del Río Coco. En la actualidad es una atracción con gran popularidad y desarrollo turístico con un excelente potencial geo-turístico. Era llamado por sus antiguos pobladores como la “Estrechura o Namamcambre”. En diciembre del 2006 fue declarado monumento nacional conforme la ley No. 605, “Ley que Declara Área Protegida en la Categoría de Monumento Nacional al Cañón de Somoto”, aprobada el 29 de noviembre de 2006 (Asamblea Nacional de Nicaragua, 23 de 06 de 2006).



Figura 2. Geositio Cañón de Somoto.

El Gran Cañón de Somoto, en su extremo occidental se encuentra los ríos Tapacalí y Comalí que se unen para formar el Río Coco (también conocido como Segovia, Wangki o Wanks), siendo el río más largo de Centroamérica. En su parte más estrecha, el cañón tiene aproximadamente 350 m de ancho entre los bordes superiores, pero sólo 4-10 m de ancho en la parte inferior. Las pendientes del cañón tienen alrededor de 190 m de altura en total, mientras que, las paredes verticales alcanzan hasta 100 m.

En el cañón hay estructuras únicamente preservadas, modeladas por la erosión fluvial, tales como las marmitas de erosión, pozas de agua, fenómenos pseudocarsticos etc. Además, se puede observar diversos tipos de los sistemas fluviales y aluviales. El carácter más relevante de este cañón se enmarca en que su desarrollo se dio en rocas de origen volcánico. El Cañón ofrece secuencias bien expuestas de varios tipos de ignimbritas que son, principalmente, rocas piroclásticas soldadas, que fueron generadas por una enorme erupción volcánica en el Mioceno ($13,89 \pm 0,74$ Ma), las ignimbritas se presentan poco y muy soldadas, son rocas muy duras y resistentes (UNAN-Managua, 2021).

Piedras Pintadas

Es un importante geosítio por su valor geológico, paisajístico y arqueológico. Geológicamente está formado por rocas volcánicas del tipo ignimbrita riolíticas de dureza débil a medianamente soldadas, formando escalones de 1 a 8 metros de espesor. Este sitio es un ejemplo de erosión selectiva en forma de una terraza estructural formado en capa resistente de ignimbrita en la parte superior e ignimbritas menos resistentes en la parte inferior. Es también un ejemplo claro de deformación frágil de rocas por fracturas y fallas (UNAN-Managua, 2021).

En Piedras Pintadas nuestros antepasados dejaron más de 500 motivos de arte rupestre, plasmados en un abrigo rocoso producto de la erosión selectiva con 30 m de alto y un ancho de 22 m. Las pictografías y petroglifos incluyen figuras zoomorfas, antropomorfas, abstractas, geométricas, astronómicas y algunas con formas no determinadas. Existen dos hipótesis sobre los autores de estas obras y ambas llevan a que fue el Grupo Lenca de procedencia suramericana de origen Chibcha (Anguaya. H., 2015), con base en la técnica usada en los petroglifos.



Figura 3. Piedras Pintadas

Tres señoritas

El nombre de Tres Señoritas se basa, según los lugareños, en un hecho ocurrido en 1542, cuando el Rey de España entregó el territorio a un encomendero llamado Pedro Sánchez Vargas; los habitantes de la zona tenían que trabajar y suministrarle la comida, además de entregarles a sus hijas con edades de 20 a 25 años para someterlas, si no lo hacían las familias eran sacrificadas. Tres muchachas llamadas Ramona, Agatota y Dislagua huyeron para liberarse del encomendero a tres macizos rocosos llamados: El Zapo, El Caballito y La Piedra Sola, ellas nunca volvieron a sus hogares (Bueno, 2017); de allí derivó el nombre de Tres Señoritas



Figura 4. Sitio Tres señoritas

El geosítio está formado por rocas sedimentarias de conglomerados rojos de la Formación Totogalpa, presenta morfología de estructuras sedimentarias, típicas de un ambiente aluvial continental. La meteorización mecánica y los procesos de erosión, dieron como resultado la evolución de torres rocosas aisladas o ciudades rocosas. Actualmente, en la zona existe un pueblo indígena de ascendencia Chorotega cuyos habitantes realizan ceremonias y rituales para la cosecha del maíz en los meses de mayo y noviembre (UNAN-Managua, 2021).



Figura 5. Geosítio Tres Señoritas. Formado de conglomerado rojo de la Formación Totogalpa. Foto tomada por Elliot Perez (IGG-CIGEO/UNAN-Managua).

Los geosítios del Geoparque Río Coco tienen la particularidad que los hacen únicos e importantes desde los conceptos de geología, geoturismo, educación, flora, fauna e identidad indígena, en ellos, encontramos la combinación de cada uno de los conceptos de una manera integradora y paisajística.



Figura 6. Geositio Cañon Seco. Formado de ignimbritas poco soldadas de la Formación Matagalpa. Fotos tomadas por Armando Muñoz (IGG-CIGEO/UNAN-Managua).



Figura 7. Geositio Laguna La Bruja, Zona de un antigua deslizamiento. Fotos tomadas por Armando Muñoz (IGG-CIGEO/UNAN-Managua).

Referencias bibliográficas

- Asamblea Nacional de Nicaragua (23 de 06 de 2006). Debates de Leyes. Obtenido de HYPERLINK "%20http://legislacion.asamblea.gob.ni/Diariodebate.n" <http://legislacion.asamblea.gob.ni/Diariodebate.nsf/1e91f0054ac77a85062572e50067fd4/9264ecad2dbd5cb806257481005e2309?OpenDocument>
- Prensa, L. (24 de 05 de 2004). La Prensa/ Editorial. Obtenido de HYPERLINK "%20http://www.laprensa.com.ni/2004/05/24/editorial" <http://www.laprensa.com.ni/2004/05/24/editorial/938265-25-aos-del-parque-nacional-volcn-masaya>.
- Parsons Corporation (1972). The geology of western Nicaragua. Final Technical Report IV, INETER, Managua, pp 1–221.
- Pásková M, Hradecký P (2014). Aspiring Geopark Rio Coco (Nicaragua). Proceedings of 14th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2014, Albena, Bulgaria, 5(II): 53–60.
- UNAN-Managua, (2021). Geología del Geoparque Río Coco. 2da edición. Instituto de Geología y Geofísica, Managua, Nicaragua: Editorial Universitaria (EU).
- UNESCO. (2010). Directrices y Criterios para Parques Nacionales Interesados en Recibir Asistencia de la UNESCO para Integrar la Red Mundial de Geoparques (GGN). Global Geoparks Network.
- UNESCO. (23 de 09 de 2017). Oficina de la UNESCO en Montevideo. Obtenido de HYPERLINK "<http://www.unesco.org/new/es/office-in->" <http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/ciencias-naturales/earth-sciences/geoparques/>
- Hradecký P (2011). Introduction to the special volume 'Subduction-related igneous activity in Central America—its nature, causes and consequences'. J Geosci 56:1–7
- Hradecký P, Šebesta J (eds) (2007). Map of Nicaraguan volcanic chain 1:200,000. Publication of the Czech Geological Survey.
- Hradecký P, Kycl P, Žáček V (2009). Somoto Grand Canyon. Publication of the Czech Geological Survey 446–410-09 (in English, in Spanish).

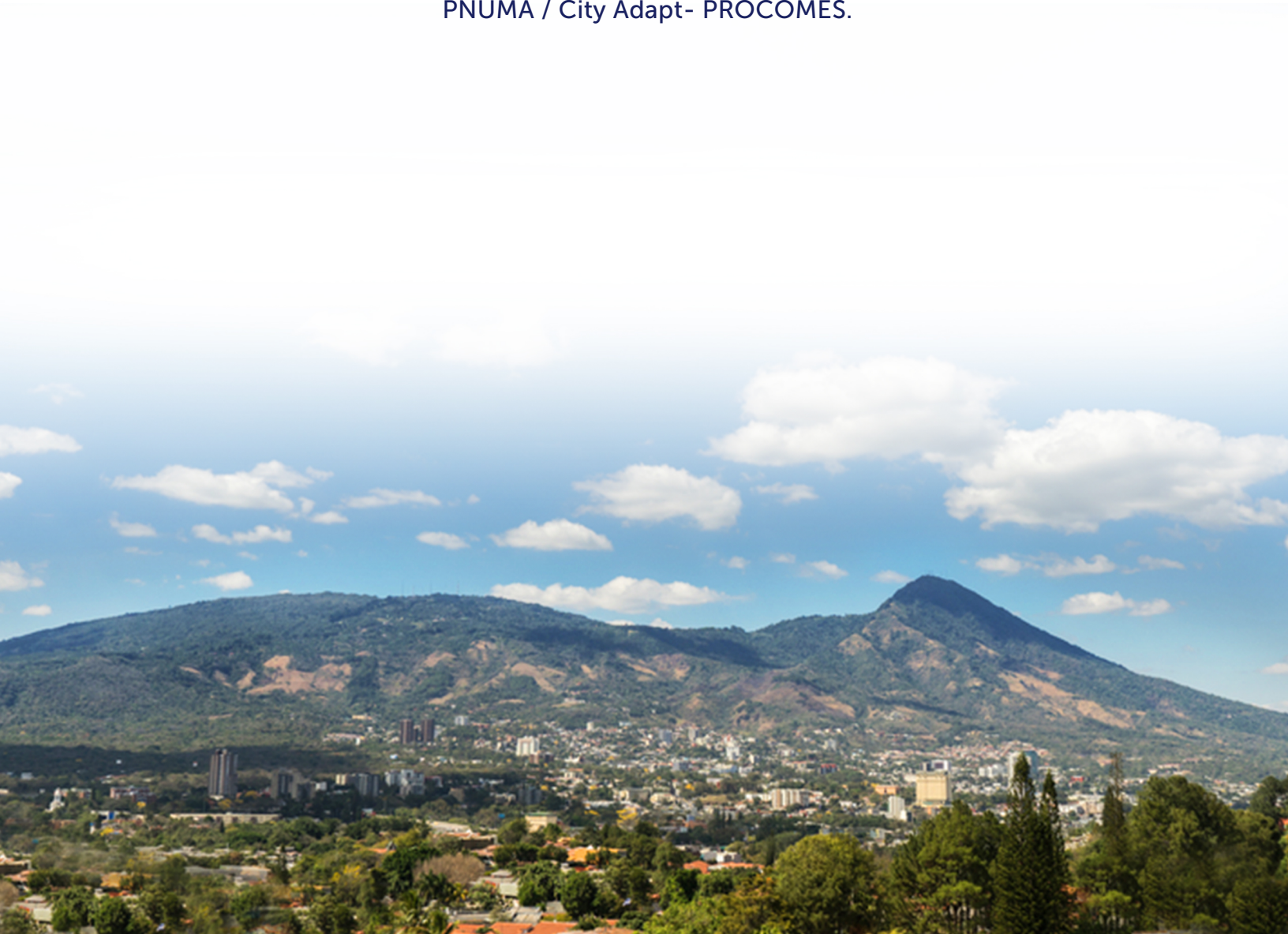
Capítulo V.

Uso del suelo CVSS y experiencias de Geoconservación.

Ponencia 32

Parcela demostrativa de soluciones basadas en la naturaleza.

Georgina Mariona/ Pablo Medina.
PNUMA / City Adapt- PROCOMES.



Parcela demostrativa de soluciones basadas en la naturaleza.

Georgina Mariona/ Pablo Medina. PNUMA / City Adapt- PROCOMES.

Resumen

Los estudios de vulnerabilidad permiten identificar las áreas de mayor peligro ante eventos relacionados con el clima (como derrumbes, deslizamientos, inundaciones, etc.), en función de la exposición, la sensibilidad y la capacidad adaptativa del territorio analizado. Se realizan a través de procesos participativos y de escenarios climáticos, que integran a la vez variables climáticas, ambientales y socioeconómicas.

Como parte de la construcción de resiliencia climática en sistemas urbanos se tiene como objetivo: incrementar la capacidad del gobierno y de las comunidades locales para adaptarse al cambio climático, a través de la integración de la AbE dentro de la planificación urbana, en el mediano y largo plazo, ésto implica que los involucrados y beneficiarios de estos proyectos son personas del ámbito de las comunidades, gobierno central, municipalidades, sector académico y sector privado.

Parte de los resultados de la construcción de resiliencia climática se tienen:

- Fortalecimiento de capacidades para la integración de AbE en la planificación del desarrollo.
- Intervenciones piloto de AbE urbana en la microcuenca Arenal Monserrat.
- Intercambio de conocimiento y concientización sobre AbE.

Análisis de vulnerabilidad socioambiental microcuenca Arenal Monserrat

Para poder entender la vulnerabilidad socioambiental de un lugar es necesario tener en cuenta otros factores que están presentes siempre y que forman parte

de un todo, con base en estos factores se pueden crear fórmulas que nos dan estimaciones del grado de exposición, que tiene un lugar ante un peligro y también el grado de vulnerabilidad. Con base en base estos factores se estima la vulnerabilidad socioambiental.

$$\begin{aligned} \text{Densidad poblacional} + \text{Riesgos} &= \text{Exposición} \\ \text{Exposición} + \text{sensibilidad} &= \text{Impacto} \\ \text{Impacto} + \text{Capacidad adaptativa} &= \text{Vulnerabilidad socioambiental} \end{aligned}$$

Dentro de las intervenciones piloto que se desarrollan están restauración de 1000 ha de cafetales, restauración de quebradas urbanas y periurbanas, huertos escolares y comunitarios, restauración de 150 ha de ecosistemas, sistemas de cosecha de agua y de saneamiento ecológico en escuelas y comunidades, pozos de absorción.

A marzo del 2021, 432.35 hectáreas restauradas en 36 fincas de café; 49,875 árboles, de los cuales 46,850 son árboles de café y 3125 son frutales; 34,217.56 metros lineales de zanjas de infiltración; 5,183 metros lineales de quebradas urbanas; 4,565 plantas entre forestales y frutales.

Implementación de huertos escolares y entrega de kits de agricultura a otras cinco escuelas, siete pozos de absorción construidos y, cada pozo, aproximadamente, infiltra 479.52 m³ /año, considerando 148 días de lluvia.

Esto generó provisión de café, leña, frutales, flores, hortalizas, Regulación Infiltración de agua 50-70 % en zonas de bosque, Regulación Infiltración de aguas 15 % en zonas urbanas, Regulación Ecurrimiento de aguas 10-20 % en zonas de bosques, Provisión Alrededor del 50 % del agua para consumo de San Salvador, Regulación Control islas de calor, disminución 1 de cada 10 % cobertura verde.

Restauración de 150 ha de ecosistemas críticos
Elaboración Plan de restauración ecosistema crítico, zona de amortiguamiento Área Protegida El Boquerón (bosque latifoliado).

Se han muestreado 17.93 ha para la identificación de flora y fauna.

Entre las especies de árboles de la zona se tienen:

Nombre común	Nombre científico	Familia	MARN
aguacate	Persea americana	Lauraceae	
capulín de montaña	saurauia kegeliana	Actinidiaceae	
chapernillo	Lonchocarpus minimiflorus	Fabaceae	
chaperno	Lonchocarpus sp	Fabaceae	
chaperno blanco	Lonchocarpus santarosanus	Fabaceae	Amenazada
guachipilin	Diphysa americana	Fabaceae	Amenazada
mano de león	Dendropanax arboreus	Araliaceae	
pino	Pinus oocarpa	Pinaceae	
zapotillo de montaña	Clethra lanata	Clethraceae	
capulín de montaña	Saurauia kegeliana	Actinidiaceae	
durazno	Prunus persica	Rosaceae	
nispero de montaña	Manilkara chicle	Sapotaceae	
tatascame	Perymenium grande	Asteraceae	

Figura 1. Especies de árboles en área protegida Boquerón (City Adapt, 2020).

Población beneficiada con las medidas de protección del medio: 115,000 habitantes de la microcuenca Arenal Monserrat, los beneficios sociales que se tuvieron a partir de estos proyectos son:

- Reducción de impactos económicos debido a derrumbes, deslizamientos, incendios e inundaciones urbanas.

- Impacto sobre los medios de vida (cultivos de café, hortalizas, flores y agricultura de subsistencia, viveros, leña y producción de carbón).
- Seguridad y soberanía alimentaria.
- Seguridad hídrica.
- Creación de empleo.
- Apoyo a la alimentación.
- Incremento en el rendimiento de los cultivos.
- Reducción del gasto en compra de los alimentos.
- Ingresos por comercialización de productos.

Parcela demostrativa

El objetivo de la parcela demostrativa es mostrar las intervenciones de Sbn implementadas por el proyecto City Adapt, en la microcuenca Arenal Monserrat. La parcela muestra una buena parte de las intervenciones que se están realizando en toda la microcuenca y mostrar los beneficios de las medidas.

Dicha parcela se ubica en el tablón El Brotonal, de la cooperativa El Espino, Antiguo Cuscatlán.

La parcela demostrativa consta de varios componentes los cuales son:

- Zanjas de infiltración.
- Barreras vivas y muertas.
- Agricultura orgánica.
- Siembra de café — cacao.
- Pozos de absorción.

Referencias bibliográficas

Evaluación de vulnerabilidad socioambiental en la microcuenca del Arenal Monserrat
<https://cityadapt.com/estudios-de-vulnerabilidad/>



MINISTERIO DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS
NATURALES

www.marn.gob.sv | medioambiente@marn.gob.sv

