EL DOMO EL GÜEGÜECHO Y LA EVOLUCIÓN VOLCÁNICA. SAN PEDRO PERULAPÁN (DEPARTAMENTO DE CUSCATLÁN), EL SALVADOR PRIMER INFORME

Walter Hernández
Guillermo E. Alvarado,
Brian Jicha
Luis Mixco

COLECCIÓN INVESTIGACIONES
Universidad Tecnológica de El Salvador
41

Universidad Tecnológica de El Salvador

Título de la investigación
EL DOMO EL GÜEGÜECHO Y LA EVOLUCIÓN VOLCÁNICA. SAN PEDRO PERULAPÁN (DEPARTAMENTO DE CUSCATLÁN), EL SALVADOR
PRIMER INFORME

Equipo investigador

Walter Hernández,[1,2] Guillermo E. Alvarado,[3] Brian Jicha,[4] Luis Mixco[2]

[1]Universidad Tecnológica de El Salvador
[2]Observatorio Ambiental, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
[3]Centro de Investigaciones Geológicas, Universidad de Costa Rica
[4]Department of Geoscience, University of Wisconsin-Madison, USA

Colaboración

Blanca Ruth Orantes

La presente investigación fue subvencionada por la Universidad Tecnológica de El Salvador. Las solicitudes de información, separatas y otros documentos relativos al presente estudio pueden hacerse a la dirección postal: calle Arce, 1020, Universidad Tecnológica de El Salvador, Vicerrectoría de Investigación, Dirección de Investigaciones, calle Arce y 17 avenida Norte, edificio *José Martí*, 2.ª planta, o al correo electrónico whernandez@marn.gob.sv; whernandez@geologist.com y vicerrectoríadeinvestigacion@utec.edu.sv
El investigador Alvarado, colaboró de manera desinteresada como miembro del Centro de Investigaciones Geológicas de la Universidad de Costa Rica.

San Salvador, 2014
Derechos Reservados
© Copyright
Universidad Tecnológica de El Salvador

WISCONSIN
UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
EL SALVADOR

551.21
D673d El Domo El Gueguecho y la evolución volcánica, San Pedro Perulapán (departamento de Cuscatlán), El Salvador : primer informe / Walter
sv Hernández, Guillermo E. Alvarado, Brian Jicha, Luis Mixco. -- 1ª ed. -- San Salvador, El Salv. : Universidad Tecnológica de El Salvador, 2014.
47 p. : il. ; 23 cm. --(Colección investigaciones ; 41)

ISBN 978-99961-48-34-7

1. Cúpulas (Domo)-Geología. 2. Volcanes-San Pedro Perulapán, Cuscatlán. 3. Cenizas y tobas volcánicas. 4. Vulcanismo. 5. Geología-El Salvador. I. Hernández, Walter, coaut. II. Título.

BINA/jmh

AUTORIDADES UTEC

Dr. José Mauricio Loucel
Presidente Junta General Universitaria

Lic. Carlos Reynaldo López Nuila
Vicepresidente Junta General Universitaria

Sr. José Mauricio Loucel Funes
Presidente UTEC

Ing. Nelson Zárate
Rector UTEC

El domo el güegüecho y la evolución volcánica.San Pedro Perulapán (departamento de Cuscatlán), El Salvador. Primer informe
Walter Hernández • Guillermo E. Alvarado • Brian Jicha • Luis Mixco

Vicerrectoría de Investigación

Licda. Noris Isabel López Guevara
Vicerrectora

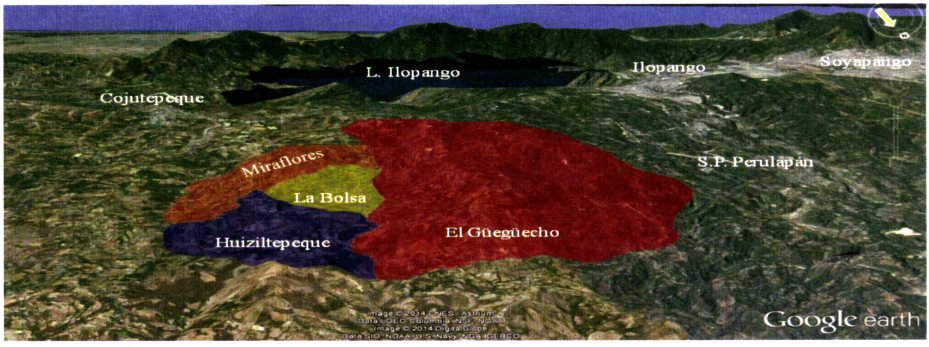
Licda. Blanca Ruth Orantes
Directora de Investigaciones

Licda. Evelyn Reyes de Osorio
Diseño y Diagramación

Noel Castro
Corrector

PRIMERA EDICIÓN
75 ejemplares
Diciembre, 2014

Impreso en El Salvador
Por Tecnoimpresos, S.A. de C.V.
19 Av. Norte, No. 125, San Salvador, El Salvador
Tel.:(503) 2275-8861 • gcomercial@utec.edu.sv



Agradecimientos

Estamos muy agradecidos con la Licda. Noris Isabel López Guevara, Vicerrectora de Investigación, y a la Licda. Blanca Ruth Orantes, Directora de Investigaciones de la Universidad Tecnológica de El Salvador, por el patrocinio de esta investigación y por la confianza y apoyo para que este trabajo pudiera realizarse. Al Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por apoyar la realización del proyecto. AsiWmismo, a la MSc. Celina Kattán, Directora del Observatorio Ambiental/MARN, que ofreció el apoyo logístico en este estudio. Además, a Douglas Hernández, Mario Reyes, Miguel Alvarenga, y Xochilt Gutiérrez, que colaboraron en distintos aspectos en este trabajo. Al personal de LaGeo, al Ing. Julio Guidos, Gerente de Investigaciones, por permitir el uso de equipo de laboratorio petrográfico; a Elizabeth de Henríquez, por el apoyo en la interpretación y discusiones de petrografía; a la Dra. Dolores Ferrés y MSc. Carolina Rivas, por la revisión inicial, final y sugerencias para el manuscrito de esta investigación.

ÍNDICE

1. Resumen..... 7
2. Introducción..... 7
3 Condiciones geodinámicas..... 9
3.1 Tectónica local..... 11
4. Geomorfología del domo..... 12
5. Geología y estratigrafía del domo 14
5.1 Secuencia freática-freatomagmática 15
5.2 Extrusión del domo 20
5.3 Alteración de las lavas 23
6. Petrografía..... 24
7. Geoquímica 26
8. Geocronología 29
9. Crecimiento y evolución del domo..... 30
9.1 Depósitos piroclásticos del domo 31
9.1.2 Características físicas de las lavas 33
9.2 Emplazamiento y crecimiento del domo 34
9.2.1 El domo El Güegüecho y relación estratigráfica..... 35
9.3 Tectónica y deformación del domo..... 36
10. Peligros y recursos asociados a los volcanes monogenéticos..... 38
10.1 Explosividad inicial 38
10.2 Sismicidad 38
10.3 Recursos geoarqueológicos 39
11. Conclusiones 39

12. Referencias 42
Anexo..... 46

El domo El Güegüecho y la evolución volcánica. San Pedro Perulapán (departamento de Cuscatlán), El Salvador

1. Resumen

La caldera de Ilopango, situada en la parte central de El Salvador, constituye un supervolcán que en su historia ha tenido varias erupciones explosivas. Dichas erupciones estuvieron acompañadas también por un volcanismo monogenético, tanto intra como pericaldérico, de composición basáltica, dacítica y riolítica. El cerro El Güegüecho es uno de esos volcanes que se formó al norte del borde caldérico y es motivo del presente estudio. El emplazamiento del domo riolítico (73.17 % de SiO_2), con área de 16.2 km^2 y volumen de 1.5 km^3, fue precedido por erupciones vulcanianas y freatomagmáticas, eventos explosivos cuya estimación del VEI ~4. El domo es asimétrico con lóbulos de lava que se extienden hacia el norte y noreste. Está compuesto por un magma evolucionado que se emplazó a 7 km al norte del borde caldérico. Petrográficamente, la matriz de vidrio presenta rasgos de destrucción por surgimiento de perlitas en los bloques de la brecha lateral y desvitrificación con la formación de esferulitas, las cuales reflejan el proceso de alteración que se inició durante su formación hace 1.88 ± 0.17 Ma, bajo un clima subtropical. Al final, el domo con DRE ~ 1.5 km^3 fue deformado por la actividad tectónica del tipo extensional, produciendo varios bloques con desplazamientos normales. Estos bloques fueron cubiertos por material piroclástico de las erupciones plinianas TB4 y posteriormente TBJ, ambas de la caldera de Ilopango.

Palabras claves: domo riolítico, freatomagmatismo, zonas de falla, tectónico, perlitas.

2. Introducción

A lo largo de la parte central de El Salvador se extiende la cadena volcánica cuaternaria, la cual se ha establecido dentro de la estructura conocida como el Graben Central, donde se localizan los volcanes más activos y bajo vigilancia: Santa Ana, Izalco, El Boquerón, Ilopango, San Vicente y San Mi-

guel. La caldera de Ilopango es uno de los volcanes activos que ha tenido una prolongada actividad eruptiva caracterizada por explosiones que han llegado afectar, en ocasiones, la región centroamericana, como fue el caso de la erupción Tierra Blanca Joven (TBJ) que impactó a la civilización Maya (Meyer-Abich, 1956; Sheets, 1979; Dull et al. 2001; Dull et al., 2010). Esta caldera tiene asociado un volcanismo monogenético que ha venido acompañando los episodios explosivos, el cual se ha establecido a su alrededor y en su interior, llegando a formar un campo de volcanes monogenéticos. El cerro El Güegüecho forma parte de un grupo de volcanes que están situados entre San Pedro Perulapán-Cojutepeque-San Rafael Cedros en la parte central de El Salvador (figura 3). Esta área volcánica está adyacente al flanco norte de la caldera de Ilopango y ocupa un área aproximada de 180 km^2.

El domo El Güegüecho es el que tiene la mayor dimensión, con elevación de 927 msnm. La erupción del domo comenzó con una actividad explosiva que se generó por el contacto del magma riolítico y las aguas de un acuífero superficial. Esa erupción explosiva produjo muchos flujos piroclásticos ricos en pómez y con fragmentos angulares de riolitas juveniles con frecuentes intercalaciones de oleadas piroclásticas laminadas y eventuales capas de pómez de caída grueso. Sobre estos depósitos piroclásticos se emplazaron las lavas riolíticas del domo (73.17 % SiO_2) con moderada presencia de cristales (12-19%) y alta viscosidad, induciendo esfuerzos de cizalla en el movimiento de las lavas y la formación del bandeado. La pendiente del flanco norte de la caldera de Ilopango permitió que las lavas formaran lóbulos, dándole una forma alargada en dirección norte. Este tipo de lavas produjo lavas subaéreas que se acomodaron una sobre la otra, originando laderas empinadas. Lo anterior sugiere que el régimen de la formación del domo fue exógeno. Alrededor de las laderas del domo están los depósitos clásticos gruesos, formando el depósito de talus o brecha lateral.

La actividad tectónica posterior al emplazamiento, en el pleistoceno inferior, produjo fallamientos de rumbo norte y noroeste en ese macizo, provocando bloques con desplazamientos normales y modificando la forma original del domo. La mayor parte de las lavas de este volcán están erosionadas y muestran la presencia de un suelo residual con presencia de arcillas en sectores con fallas. En varios lugares se observan lentes delgados de lapilli de pómez riolítico de TB4 de 36 ka (Kutterolf et al.,2008b) y una cobertura más amplia de tefras de TBJ (535 D.C. Dull et al.,2010), ambos asociados a la caldera de Ilopango. El análisis radiométrico de una roca del domo, mediante Ar^{40}/Ar^{39},

determinó la edad de 1.88 ± 0.17 Ma y con DRE (Roca densa equivalente) = 1.5 km^3. Al parecer es uno de los centros volcánicos cuaternarios más antiguos de esa área, ya que la mayoría no se encuentran fallados. La composición de elementos trazas incompatibles de El Güegüecho es algo similar a las lavas de otros domos y tefras de la caldera de Ilopango, por lo que se infiere que la formación de ese domo podría ser comagmático a la caldera de Ilopango debido a la migración volcánica hacia el sur y está asociada a las etapas tempranas de la evolución de una cuenca *pull-part* en la que se localiza la caldera de Ilopango.

3. Condiciones geodinámicas

La región centroamericana se localiza en la placa del Caribe, bajo la cual se subduce la placa oceánica de Cocos. La zona morfológica del encuentro entre estas placas constituye la Fosa Mesoamericana. La zona de subducción es la fuerza que genera la producción de sismos y la que mantiene activa la cadena volcánica cuaternaria que corre paralela a la Fosa Mesoamericana. También la región se ve afectada por el choque de las placas del Caribe y la de Norteamérica, que están separadas por el sistema de fallas Motagua-Polochic del tipo transcurrentes y con movimiento sinestral (figura 1). Esta falla tiene la característica particular de estar arqueada, lo cual produce una serie de fallas distensionales transversales a ese sistema. Estas fallas distensivas se caracterizan por producir estructuras tipo graben, a lo largo de lo cual se asocia un vulcanismo basáltico hasta riolítico en el graben de Ipala.

Por otro lado, la subducción ha generado una estructura de graben que se extiende por toda Centroamérica con movimientos dominantes laterales, que también corre paralela a la Fosa Mesoamericana. El límite norte de esa estructura no está bien definido y constituye el límite del antearco y de la placa del Caribe, mientras que el límite sur lo define dicha fosa. El movimiento noroeste del bloque antearco es generado principalmente por la colisión de la Dorsal del Coco con la placa del Caribe en Costa Rica (LaFemina *et al.* 2009), y también por la convergencia oblícua de la placa de Cocos bajo de la placa del Caribe (DeMets, 2001). Dentro del bloque antearco se localiza el arco volcánico activo plio-pliestoceno-holoceno. En El Salvador el bloque antearco tiene un movimiento de 14 mm/año con desplazamiento hacia el noroeste (DeMets, 2001), y secundariamente es acompañado por movimientos verticales (figura 1). La falla por medio de la cual se realiza el movimiento lateral derecho, localmente es conocida como Zona de Falla de El Salvador-ESFZ (Martínez-

Díaz et al., 2004; Álvarez-Gómez et al., 2006; Staller, 2014; Alonso-Henar et al., 2014; Canora et al. En prensa). Este ambiente tectónico activo, y muy complejo, también está asociado a un volcanismo muy activo, que hacen de toda esta región una de las de mayores incidencias de peligros geológicos: volcanismo con casi todas sus expresiones, huracanes, terremotos, tsunamis y frecuentes inundaciones, sequías y movimientos de laderas.

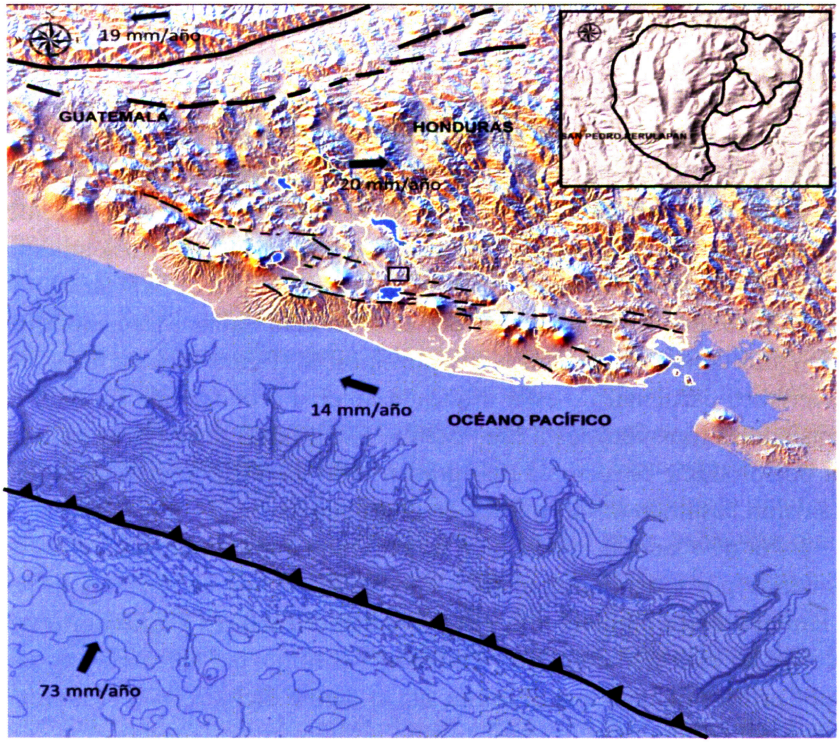


Figura 1.
Mapa mostrando el arco volcánico paralelo con el fallamiento principal WNW-ESE que atraviesa todo el país, donde predomina el movimiento transcurrente con movimiento destral. El arco volcánico es paralelo al fallamiento principal y a la Trinchera Mesoamericana. La caldera de Ilopango se localiza en la parte central de El Salvador. En el recuadro se muestran los cerros de San Pedro, inmediatamente al norte de la caldera de Ilopango, con el domo El Güegüecho más grande en la parte occidental.

3.1 Tectónica local

En las partes central y oriental de El Salvador se ha identificado la presencia de una falla regional con movimiento lateral derecho, que desde la parte norte del golfo de Fonseca se extiende hasta la parte oriental de la caldera de Ilopango. Esta falla fue denominada Zona de Falla de El Salvador-ZFES (Martínez-Díaz et al., 2004, Álvarez-Gómez et al., 2006; Alonso-Henar et al., 2014; Canora et al. En prensa). Sin embargo, esta falla no se observa en el tramo occidental de la caldera. Alonso-Henar et al. (2014) proponen, de acuerdo con los datos de campo y mapeo geológico, que inicialmente existía un componente extensional en la deformación en algún estado de la evolución de la ZFES (<6 Ma) para explicar los movimientos buzamiento-deslizamiento sobre estructuras que están comúnmente asociadas con la activa falla transcurrente de ZFES. Además, las observaciones de campo sugieren también que la migración del arco hacia la trinchera oceánica y la extensión podría deberse al movimiento de retrotracción *"roll-back"* de la placa de Cocos debajo del Bloque Chortis durante el mioceno-Plioceno. La última etapa del movimiento de retrotracción ocurrió del plioceno superior-pleistoceno, período en el cual se dio el volcanismo monogenético.

Garibaldi et al. (2011) estudian el aspecto tectónico general de la zona cercana a la caldera de Ilopango y proponen la existencia de una estructura de cuenca de tracción (*pull-apart basin*) asociada a las fallas regionales con movimiento lateral derecho. Como resultado de esos esfuerzos se forman fallas extensionales (*step-over*) en los extremos de la cuenca de subsidencia, donde se localiza la caldera de Ilopango (figura 2). Esas fallas extensionales serían las que facilitaron el ascenso magmático de la caldera para la formación del campo de volcanes monogenéticos. Los trabajos de GPS de carácter regional se han realizado en el territorio salvadoreño con la instalación de estaciones fijas y móviles para mediciones sistemáticas.

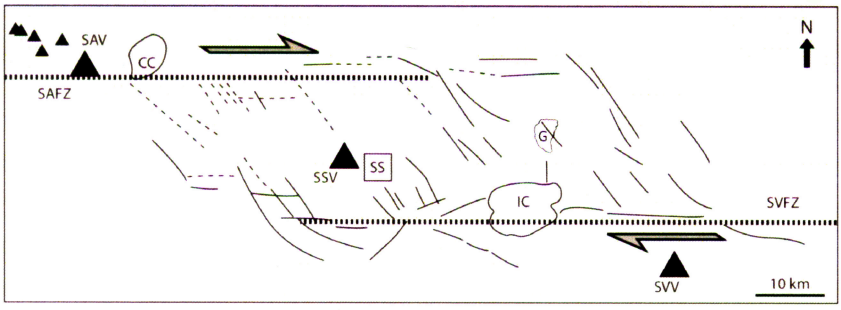


Figura 2.
Diagrama esquemático de región afectada por la cuenca *"pull-apart"*. Líneas gruesas discontinuas muestran los límites de las fallas transcurrentes de movimiento destral de la depresión tectónica. SAV: volcán de Santa Ana; CC: caldera de Coatepeque; SSV: volcán de San Salvador; SS: San Salvador; IC: caldera de Ilopago; G: domo El Güegüecho; SVV: volcán de San Vicente; SAFZ: Zona de falla de Santa Ana; SVFZ: zona de falla de San Vicente (Modificado de Garibaldi et al., 2011).

4. Geomorfología del domo

El cerro El Güegüecho se encuentra ubicado 20 km al noreste de San Salvador, 2 km al este del municipio de San Pedro Perulapán y 7 km al norte del lago de Ilopango; y en su cercanía hay varios volcanes monogenéticos de menor tamaño y de distinta composición química (figura 3). El cerro constituye el punto más elevado que sobresale de la ladera norte de la caldera Ilopango, con una altura de 927 msnm, que se levanta sobre el relieve accidentado del municipio de San Pedro Perulapán, sobre la base de 605 msnm, con área de 16.2 km^2 (con ancho máximo de 4 km y 5.5 km de largo) y su volumen de 1.557 km^3, fue obtenido por el método de análisis espacial 3D en ArcGis. Todo el complejo volcánico sobresale de su entorno alrededor de 310 m, lo cual ofrece una amplia vista panorámica a su alrededor. El río Sinuapa lo limita al oeste, mientras que al este lo hace el río Cuchata. Ambos ríos desembocan en el río Tizapa, y este último en el río Lempa. El domo se encuentra bastante desforestado facilitando el proceso de erosión, principalmente en los partes más empinadas. Las erupciones con efusión de lavas altamente viscosas, debido a su alto contenido de SiO_2 (alta resistencia a fluir), forman laderas con pendientes empinadas. A estos relieves así formados se les denomina domos o cúpulas de lava (Newhall & Melson, 1983; Lockwood & Hazlett, 2010; Gill,

2010). El aspecto alargado en dirección norte de ese macizo obedece a que se deformó un poco debido a la pendiente algo inclinada de la ladera donde las lavas se acomodaron, haciéndoles una distribución asimétrica a estas (figuras 3, 4 y 18).

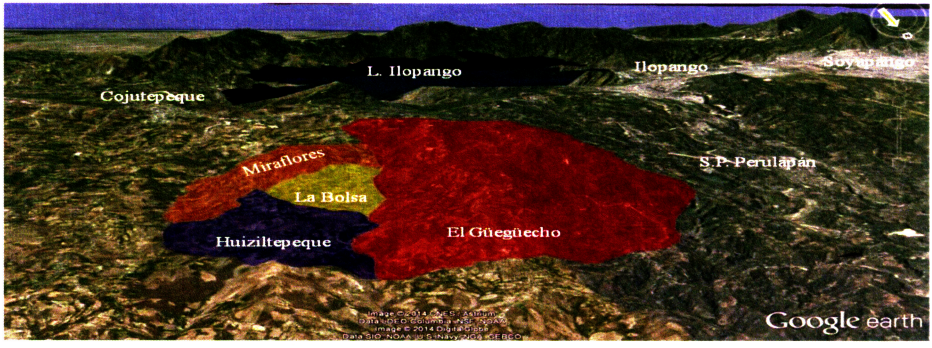


Figura 3.
El domo El Güegüecho está ubicado al 7 km al norte del lago Ilopango, al oriente de San Pedro Perulapán, y a 20 km al noreste de San Salvador. La caldera de Ilopango está situada en la parte central del país y alineada con el arco volcánico.

Si bien el cerro ya no tiene la forma de domo original debido a la perturbación por fallas que le han divido en varios cerros, se le llama domo en este trabajo debido a su estructura interna, restos geomórficos, génesis y composición riolítica. Williams & Meyer-Abich (1953, 1955) y Meyer-Abich (1956) denominaron Las Lomas de San Pedro a los cerros situados en San Pedro Perulapán que se han formado por separación tectónica. Desde el punto de vista geomorfológico, estos cerros fueron mapeados como una sola unidad por Sebesta y Chávez (2011), a los que agregaron los cerros Huiziltepeque, Miraflores y La Bolsa. Sin embargo, estos últimos son cuerpos volcánicos independientes que se formaron en tiempos distintos y su composición química varía desde basáltica hasta riolítica (figuras 3 y 4). Meyer-Abich (1956) considera que, debido a la edad del domo y a su química, El Güegüecho ha surgido como una expresión en superficie de la actividad volcánica efusiva asociada a la caldera de Ilopango en la etapa inicial de su formación. Una angosta planicie aluvial lo separa de los domos Miraflores y La Bolsa, además del cono basáltico Huiziltepeque situado al este. Este último, por estar geomorfológicamente mejor conservado y sus lavas poco meteorizadas, se considera que se emplazó por último en este complejo.



Figura 4.

Mapa de elevación digital mostrando el domo El Güegüecho y las otras estructuras volcánicas del complejo Lomas de San Pedro, puntos de afloramientos y la red de drenaje.

5. Geología y estratigrafía del domo

El emplazamiento de un domo félsico en la ladera norte de la caldera de Ilopango estuvo asociado con una fase explosiva, debido a la presencia de agua subterránea somera. La secuencia piroclástica de la caldera de Ilopango cuenta con varios depósitos, entre los cuales se encuentran capas de pómez de caída, que forman buenos acuíferos. Además, las ignimbritas, que no son buenas como acuíferos, al estar fracturadas mejoran las propiedades hidráulicas y pueden facilitar la acumulación y transportación de aguas subterráneas. En el aspecto estratigráfico, se limita a la correlación relativa del domo con los otros volcanes monogenéticos. Frullani (1989) definió para, el AMSS y sus alrededores, que los distintos depósitos piroclásticos antiguos separados por paleosuelos los agrupó en las Tobas Inferiores (Ti); mientras que los depósitos

piroclásticos más recientes, de la más antigua a la más joven: TB4, G1, TB3, TB2, G2, B1 y TBJ, en las Tobas Superiores (Ts). Entonces, la TB4 está sobre las Ti.

5.1 Secuencia freática-freatomagmática

Se han encontrado pocos afloramientos superficiales con piroclastos asociados al domo El Güegüecho, con excepción de un afloramiento que muestran las partes superior e intermedia, ninguno de ellos muestra la secuencia completa, solamente la superior, situación que impide conocer por completo los procesos eruptivos desde el inicio. En el afloramiento caserío El Cerro (figura 4, punto 3, tabla 1), en la parte media, se depositaron potentes oleadas piroclásticas, unas de tipo laminadas y con menor frecuencia de estratificación cruzada (figuras 5A y 5B). Estas oleadas suelen presentar intercalaciones de flujos de piroclásticos con bloques lávicos angulares preexistentes. Hacia la parte superior predominaron las ignimbritas con abundante pómez, cementados, con delgadas intercalaciones de oleadas piroclásticas muy duras. Sobre las ignimbritas yacen potentes depósitos de brecha lateral o talus (figura 5C).

El afloramiento Agua Buena (figura 4, punto 8) se localiza el oriente del anterior y está constituido por una capa de ignimbrita amarillenta, masiva, con matriz gruesa a media sin soldar y rica en pómez blanco porfirítico (figura 6A). Debido a la fuerte pendiente, el material de la brecha se ha rodado, pero esta ignimbrita subyace a esos bloques de la brecha del domo. En el cantón El Rodeo (punto 14), hay un afloramiento sobre un paleosuelo de una capa de pómez de caída, donde se localiza una secuencia con pómez inicial de 24 cm de espesor, subyaciendo a una delgada secuencia de oleadas piroclásticas que a su vez está debajo un depósito de ignimbrita rica en pómez > 2m de espesor. Este depósito piroclástico probablemente tenga conexión con la fase explosiva inicial del domo (figuras 6B y 16A). Sobre estas secuencias piroclásticas yace el depósito de brecha de material riolítico de 2 a 15 m de espesor, formado por enfriamiento rápido de la caparazón y acumulación por de caída la rocas desde las laderas del domo (Fink, 1983; Hale & Wadge, 2008; Wadge et al., 2009).


A


B



Figura 5.

A) Secuencia de depósitos de flujos piroclásticos con abundantes bloques lávico juveniles angulares subyacentes a secuencia de oleadas piroclásticas.
B) detalle de estratificación cruzada y bandeada.
C). Depósito de ignimbritas ricas en pómez subyacente al talus constituido por bloques de riolita. En el recuadro, detalle de la ignimbrita.

En vista que las secuencias piroclásticas son distintas en los afloramientos donde se han registrado, y considerando una extensión de 16.2 km^2 que ocupa el domo, esas diferencias sugieren que no hubo una, sino varias bocas eruptivas que aparecieron por la deformación del terreno inducida por el empuje del magma en un terreno inclinado.

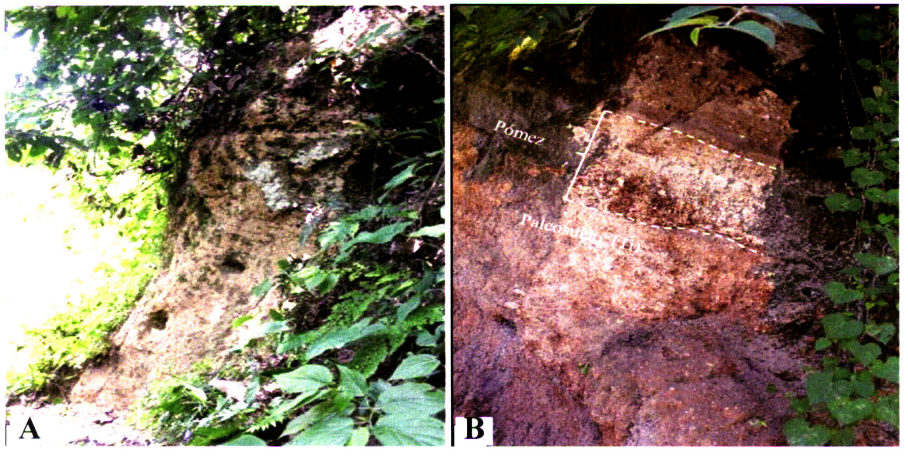


Figura 6.
Depósitos piroclásticos subyacentes al domo El Güegüecho.
A) Ignimbritas Agua Buena (punto 8) debajo de los bloque de brecha.
B) Capa de pómez de 24 cm de espesor debajo de delgada secuencia de oleadas piroclásticas y estás debajo de ignimbrita rica en pómez >2 m de espesor (punto 11). El pómez posiblemente esté asociado a la caída inicial de una erupción vulcaniana y sobreyace a un paleosuelo de pómez antiguo (Ti).

En el caserío La Esperanza (punto 2), la parte basal está compuesta por ignimbritas de matriz fina y ricas en clastos centimétricos de pómez finamente vesiculados (figuras 7C-D) y con fragmentos riolíticos perlitizados de color gris, algunos con vesículas (figuras 7A-B). Tanto el pómez como las riolitas, son angulares y juveniles (figuras 7E-F); además, hay presencia de pocos fragmentos líticos lávicos del conducto y de la boca eruptiva. La parte superior está compuesta por una secuencia de oleadas piroclásticas con intercalaciones de delgados flujos de cenizas de color amarillento claro a anaranjado y beige (figura 6A). Las oleadas piroclásticas localmente muestran deformación debido a la depositación en estado húmedo y plástico. Las ignimbritas tienen intercalaciones de depósitos de pómez de caída, café claro, gruesos, de 5 y 10 cm de espesor, cementados por óxidos de hierro debido a la meteorización. Estos depósitos están relacionados con la formación del domo.

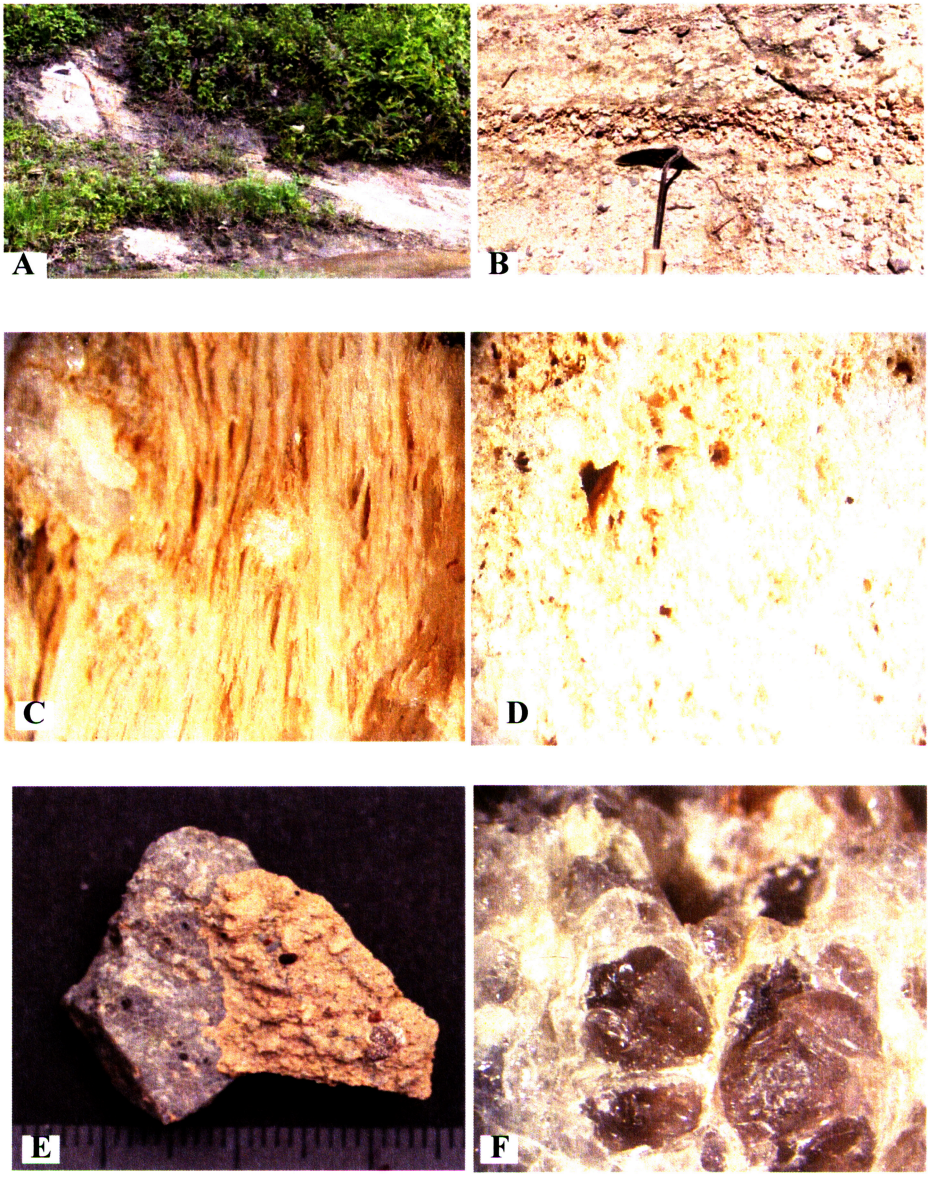


Figura 7.

Depósito piroclástico La Esperanza.

A) Porción superior de las oleadas piroclásticas con presencia de falla.
B) Detalle de dos ignimbritas separadas por una delgada de caída de pómez tubular.
C) Vesículas en pómez mostrando el corte paralelo a las vesículas elongadas y la presencia de cristales.
D) Corte transversal a la elongación de las vesículas.

E) Fragmento de Ignimbrita mostranto matriz anaranjada pálido de cenizas con clastos juveniles grises de riolita perlitizada y pocos líticos café y rojos de lavas de andesita-basálticas.
F) Detalle macroscópico de la textura perlítica en la matriz vítrica.

Los fragmentos de pómez se caracterizan por contar con vesículas tubulares muy finas y paralelas al eje más largo de los fragmentos de pómez. Esto sugiere que durante el ascenso hubo, en determinado momento, mayor desplazamiento del magma que la velocidad de ascenso de las vesículas, transformando la forma circular de estas a formas de tubos; y tal cambio ocurre abajo de la boca eruptiva (Heiken & Wholetz, 1991). En vista de que las secuencias piroclásticas son distintas en los puntos de afloramientos donde se han registrado, esto indica que no hubo una boca eruptiva principal antes del surgimiento del domo, sino que existieron varias bocas eruptivas que aparecieron por la deformación del terreno inducida por el empuje del magma en un terreno inclinado y de gran área.

5.2 Extrusión del domo

De alguna manera, el contacto del acuífero con el magma fue obstruido, ya sea sellado por el magma o por deformación en la porción superior de la superficie del terreno; lo anterior impidió el contacto agua-magma, condición necesaria para el inició de la fase de formación del domo. La extrusión de la lava viscosa a través de la chimenea, fue erosionando el canal y mejorando su forma más circular para facilitar el ascenso del magma hasta alcanzar la superficie del terreno, donde yacían los depósitos freatomagmáticos. Sobre esos depósitos se comenzó a acumular lava, y todo este proceso fue acompañado de una actividad sísmica bastante localizada alrededor de la boca eruptiva. En el corte de la carretera, y en el punto 7 (figura 4), se observa un bandeado de color gris y café claro que sugieren capas de distintos grados de cristalinidad y no necesariamente diferencia de composición química. Esas bandas son las rampas de lavas bandeadas que están mejor expuestas en ese sector (figura 8). Mientras que en el punto 16, en el cantón Tecoluco Arriba, las lavas tienen el bandeado tenue dando un aspecto masivo (figura 9). Este rasgo y la distribución geométrica de las rampas sugiere que las lavas fueron extrusionadas hasta la superficie a través de discontinuidades internas, cuyo régimen es conocido como crecimiento exógeno (Hale & Wadge, 2008).

El bandeado está relacionado con una zona de bandas de cizallas, que físicamente corresponde a una débil zona tensionada con alta tasa de defor-

mación; y es donde el material se romperá. Esa zona débil es la que induce la generación de un rasgo quebradizo dentro de las bandas de cizalla (Hale & Wadge, 2008; Hale, 2008). La presencia de las bandas de cizallas es indicativo de una alta viscosidad y de esfuerzos de cizalla. En el régimen exógeno, durante la construcción del domo El Güegüecho, pudo haber aumentado la razón de descarga de lava al final de la erupción, o bien, pudo haber salido la lava a mayor temperatura, permitiendo disminuir relativamente la viscosidad y que las lavas se desplazaran más en dirección de la pendiente, formando lóbulos y adoptando la forma alargada de un domo colada (también conocido como tipo *coulée*) (figuras 3 y 18).

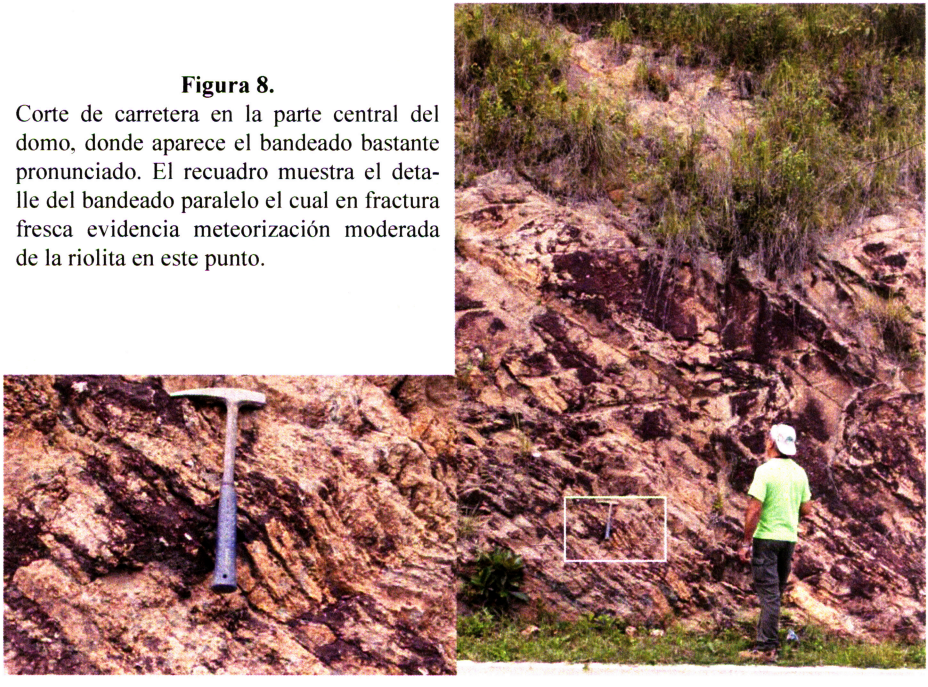


Figura 8.
Corte de carretera en la parte central del domo, donde aparece el bandeado bastante pronunciado. El recuadro muestra el detalle del bandeado paralelo el cual en fractura fresca evidencia meteorización moderada de la riolita en este punto.

La composición química de la lava tiene un contenido alto en sílice (73.17 % de SiO_2), y este tipo de lavas viscosas normalmente poseen baja tasa de extrusión. En adición, la moderada presencia combinada de fenocristales y microfenocristales en la lava (12-19%) indica, de acuerdo con Wadge et al. (2009), que pudo haber desgasificación durante el ascenso del magma que indujo la cristalización de microlitos a relativa baja profundidad en el conducto o

en el mismo domo. Este porcentaje moderado de cristalización produce cierto estrés en la superficie de la lava, por tanto, no facilita el desarrollo del material clástico del talus. Las lavas que tienen menos porcentaje de fenocristales no muestran bandeamiento pronunciado, más bien parecen algo masivas (figura 9A). Esas variaciones texturales en las lavas se deben a variaciones en la viscosidad, la cual es altamente dependiente, entre otros factores, de la temperatura y del grado de cristalinidad.



Figura 9.
Riolitas menos bandeadas en el cantón La Esperanza. A) Parte superior del macizo en el extremo norte del domo (punto 16). Esta lava fue extruida; hacia el final del emplazamiento del domo se encuentra meteorizado. B) lava bandeada y más fresca en la parte inferior del macizo rocoso (punto13).



Figura 10.
Brecha lateral o talus en la ladera norte del domo El Güegüecho, Cantón La Esperanza (punto 1). A) Talud de 10-14 m de altura mostrando el talus. B) Detalle de la brecha mostrando fragmentos de riolita juvenil muy angulares, de distintos tamaños, con moderada matriz gruesa del mismo material. La parte más externa de la mayoría de los bloques presenta perlitas.

La lava más externa del domo tuvo enfriamiento rápido, formando una especie de cáscara que cubre el magma más caliente y plástico en su interior. El material vítrico de esa caparazón delgada es afectada por estrés debido al choque térmico al entrar en contacto con el aire, y ese estrés es liberado bajo la forma de fracturamiento. El resultado es el surgimiento de fragmentos angulosos, con bordes agudos (Schmincke, 2004; Hale, 2008; Hall & Wadge, 2008). Por el movimiento que se genera durante el crecimiento del domo y las paredes empinadas, fragmentos angulares de tamaños muy variados se desprenden de la caparazón y caen sobre las tefras formadas en las etapas previas al emplazamiento del domo, dando origen al depósito de talus o brecha lateral (figura 10). El tamaño del domo es bastante grande y ocupa un área de 16.2 km^2, mientras que el volumen de roca densa equivalente es de 1.5 km^3 (DRE). Si comparamos los volúmenes del domo El Güegüecho (1.88 ± 0.17 Ma) con el domo Islas Quemadas (marzo de 1880), este último ubicado en el interior del lago de Ilopango, observamos que el primero es casi once veces mayor que el segundo (V1 = 1550 m^3 x10^6; V2 = 150 m^3 x 10^6 [Newhall & Melson, 1983)].

5.3 Alteración de las lavas

Debido a la edad de las lavas riolíticas del domo en ambiente subtropical, donde las temperaturas son moderadamente calientes y las precipitaciones importantes (1.800 mm/año), es de esperar un grado de meteorización de moderado a alto. Steen-McIntyre (1975) sostiene que el vidrio se caracteriza por ser metaestable debido al desorden estructural de las moléculas de SiO_2.

Esta inestabilidad del vidrio se torna vulnerable a la hidratación que ocurre durante la meteorización como agua difusa en el vidrio volcánico desde la superficie expuesta a la humedad. Además, la obsidiana riolitica masiva con relativo bajo contenido de sílice se hidratará más lenta que la obsidiana riolitica con alto contenido de sílice, y todos los vidrios se hidratarán más rápido en climas cálidos que en climas fríos. También los vidrios de composición más máfica, como los vidrios basálticos se hidratan más rápido que los félsicos. Estas aseveraciones pueden ser aplicables también para las lavas riolíticas del domo El Güegüecho con casi 2 Ma, que tienen meteorización moderada. Fisher & Schmincke (1984) consideran que la alteración del vidrio silícico parece involucrar una etapa inicial de difusión controlada de hidratación y de intercambio del ion alcalino, pero de cambios químicos generales menores. Esto es comúnmente seguido por una etapa de destrucción de la matriz vítrica y la precipitación de fases secundarias, en los espacios de poros creados por la disolución del vidrio. Como el agua se mueve a través de la estructura del vidrio, forma un frente bien definido, paralelo a la superficie expuesta. Estos procesos están relacionados con la alteración y destrucción de la matriz del vidrio volcánico en las lavas del domo. La matriz vítrica representa la parte vulnerable a la hidratación, originando perlitas, que se manifiestan como finas fracturas (figuras 7E-F). Es a lo largo de las fracturas de las perlitas donde el intercambio iónico es más intenso, siendo los álcalis de iones monovalentes de Na^+ y K^+ el intercambio más común; además, la hidrataci ón depende exponencialmente del tiempo y de la temperatura, así como también de la composición química. La tasa de hidratación se incrementa cuanto mayor es la temperatura y el contenido de SiO_2 (Fisher & Schmincke, 1984). Esto se traduce en que la matriz vítrica de lava del domo tiene bastante hidratación y, por tanto, está oxidada (figura 11). Otra alteración es debida a la desvitrificación de la matriz que origina la textura esferulítica, la cual se compone por fibras de sílice (calcedonia), y en luz polarizada produce, extinción ondulante (figuras 11B y 12B).

6. Petrografía

En el análisis al microscopio polarizante de la sección delgada de la lava del domo en el cantón El Rodeo (figura 4, punto 13), la roca está compuesta por: pocos fenocristales de plagioclasa (albita, 7 %), sanidina (3 %), cuarzo (1 %), minerales opacos (3 %) y trazas de piroxeno (2 % de ortopiroxeno)

y microlitos+microfenocristales (feldespato y biotita 3 %) y una matriz vítrica (81 %). La matriz vítrica, en algunas partes, muestra la textura de flujo (figura 11A), y en su mayoría presenta textura esferulítica (figura 11B). La textura esferulítica es debida a la desvitrificación de la matriz, principalmente compuesta por fibras de sílice (calcedonia). Se encuentran también agujas de minerales opacos y trazas de biotita en la matriz y oxidación de minerales opacos. Las plagioclasas (albita) están generalmente macladas y distribuidas en toda la roca. Los cristales de cuarzo son redondeados y la mayoría con textura esferulítica. Los piroxenos son generalmente ortopiroxenos y los bordes de los cristales están oxidados. Dentro de la lava se observa una franja de lava con textura fluidal también riolítica, que podría corresponder a una zona de cizalla (Figura 11B). El grado de cristalinidad de esta lava es de 19 %.

La sección delgada de una lava en superficie (figura 4, punto 16) tiene una matriz intergranular (88 %) con microlitos, principalmente de plagioclasas, biotita, anfíboles y opacos. Cristales de plagioclasa (6 %) con zonación compleja. Anfíboles (2 %) zonados e hipidiomórficos. Biotita (1 %) con inclusiones de opacos. Ortopiroxeno ($\leq$ 0.5%) hipidiomórficos. Clinopiroxeno ($\leq$ 0.5 %) hipidiomórficos, minerales opacos (0.5 %) y microfenocristales y microlitos (2 %). La matriz vítrica muestra desvitrificación que se manifiesta a través de la cristalización incipiente a través de muchos pequeños centros de desvitrificación que forman las esferulitas. Las esferulitas presentan extinción ondulante debido a los cristales individuales orientados radialmente (figura 12B). El grado de alteración de la lava del domo puede considerarse en etapa intermedia y localmente en su techo está avanzado por haber estado a la intemperie. El grado de cristalinidad es de 12%. Es importante la presencia de fenocristales máficos de hornblenda y biotita, que son minerales hidratados y estables en la riolita; además, son indicadores de presión de agua en el magma (Newhall & Melson, 1983; Gill, 2010).

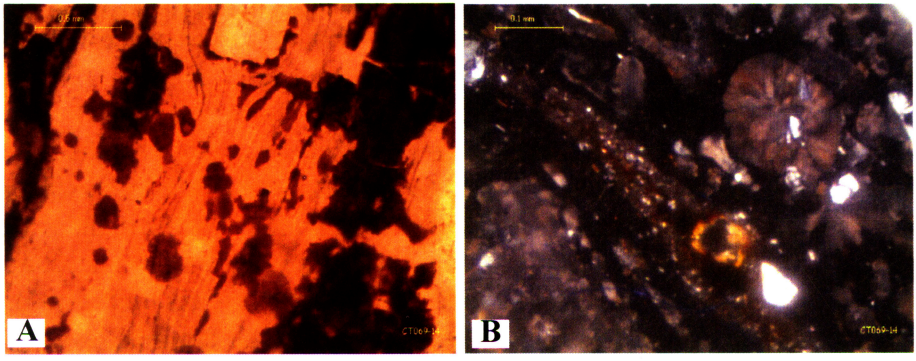


Figura 11.
Secciones delgadas de lava riolítica del punto 13.
A) Textura fluidal en matriz de vidrio.
B) Dentro de la lava se observa una franja de lava también riolítica.

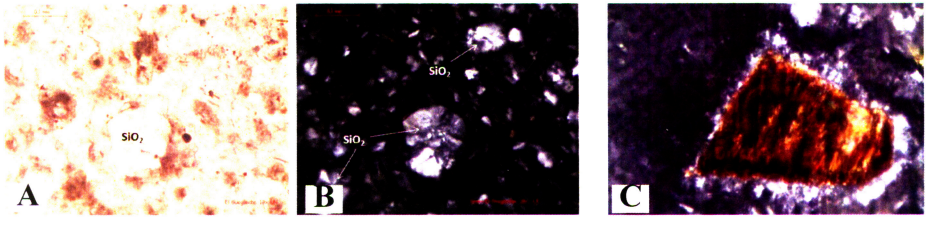


Figura 12.
Sección delgada de lava riolítica del punto 16.
A) LN Matriz vítrica en proceso de desvitricación originando esferulitas de calcedonia (SiO_2) e incipientes fracturas perlíticas.
B) Se observa en LP los pequeños rasgos circulares aparecimiento de los incipientes cristales conocidos como esferulitas con extinción ondulante.
C) Cristal de biotita observado en LP, inmerso en matriz vítrica en cuyo borde se ha desvitrificado en proceso de transformación en minúsculos cristales (calcedonia).

7. Geoquímica

Los análisis de elementos mayores y trazas de roca total se realizaron mediante técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) en el Laboratorio geoanalítico de la Universidad Estatal de Washington (http://

www.sees.wsu.edu/Geolab/index.html). Los elementos principales analizados, usando FRX, son precisos hasta más de 0.2 % (veahttp://sees.wsu.edu/Geolab/note/xrfprecision.html). La precisión de los datos de FRX se basan en cientos de mediciones de muestras replicadas a través de una amplia gama de concentraciones. La precisión analítica para la mayoría de los elementos trazas a través de ICP-MS es típicamente ±3 %. Los experimentos de calentamiento gradual de $^{40}Ar/^{39}Ar$ se llevaron a cabo en una matriz preparada a partir del domo El Güegüecho. En el laboratorio de Geocronología de Gases Raros de la Universidad de Wisconsin, se realizó el análisis en el horno de calentamiento gradual en 200mg de matriz, empleando los métodos de Jicha et al. (2012). Los análisis de isótopos de argón fueron hechos utilizando el Mass Analyzer Products (MAP215-50), y el dato se redujo usando el *software* ArArCalcversión 2.5 (http://earthref.org/ArArCALC/).

Como resultado, el diagrama de sílice-álcalis (TAS) muestra la composición total de la muestra del domo El Güegüecho en comparación con lavas, tefras y domos de la región de Ilopango (figura 13). Las muestras de Ilopango se ubican en el medio del grupo subalcalino K_2O, basado en el sistema de clasificación de Le Bas et al. (1986). Las composiciones varían desde andesita basáltica a riolita, pero faltan las composiciones intermedias (59 a 63 % en peso de SiO_2), es decir, hay una brecha composicional. El domo El Güegüecho es riolítico y está entre los más evolucionados en el juego de rocas de Ilopango. Existen numerosos conos y domos monogénicos que aún no han sido estudiados, por tanto, no existen datos químicos de ellos. Cuando se obtengan los análisis adicionales de esas estructuras volcánicas en el futuro, se podrá verificar si la brecha es real o se trata de un sesgo de muestreo. Los datos normalizados de los elementos trazas del manto primitivo es mostrado en un diagrama de variación de elementos incompatibles (figura 14). Todas las muestras tienen características típicas de magmatismo de la zona de subducción, incluyendo las disminuciones relativas en Nb y Ta y elevadas concentraciones de iones de grandes elementos litófilos (LILE) (por ejemplo, Rb, Sr, Ba), en relación con los elementos de tierras raras (REE). Los patrones de REE normalizados del manto primitivo tienen enriquecimientos débiles en REE pesados más que REE medio, lo que se atribuye comúnmente al fraccionamiento del anfíbol. La composición de elementos trazas incompatibles de El Güegüecho es generalmente similar a las lavas y tefras de la caldera de Ilopango, pero tiene bajas concentraciones de elementos de tierras raras, medios y pesados.

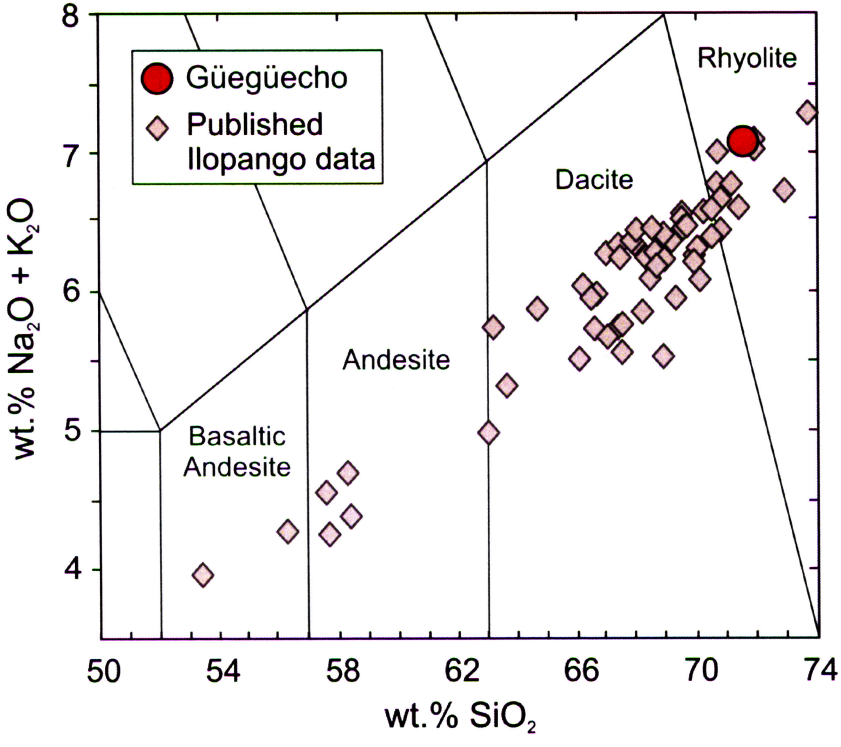


Figura 13.

(TAS) Diagrama de Alcalis total Sílice y la clasificación después de LeBas et al. (1986). Datos publicados de química de roca total de Ilopango: Carr & Rose (1987), Mann etlal. (2004) y Garrison et al. (2012).

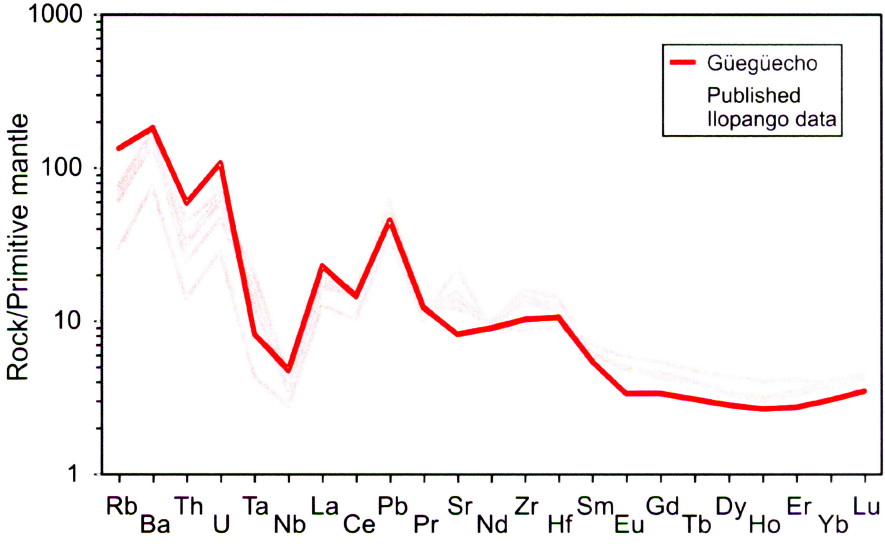


Figura 14.
Diagrama de elementos incompatibles del manto primitivo normalizado (Suny & McDonough, 1989). Datos de Ilopango de Garrison et al. (2012). Los datos para la cúpula de El Güegüecho se muestran en color rojo.

8. Geocronología

La matriz del domo de lava El Güegüecho produjo una edad meseta de $^{40}Ar/^{39}Ar$ de 1.88 ± 0.17 Ma. La meseta comprende más del 96 % de ^{39}Ar liberado (figura 15). La edad $^{40}Ar/^{39}Ar$ es significativamente mayor que las edades publicadas de K-Ar y ^{14}C de cúpulas y tefras asociadas al pleistoceno de la fase eruptiva de la caldera Ilopango (típicamente < 80 ka), pero es ligeramente anterior con las primeras erupciones de ignimbritas de Ilopango que corresponden a las "tobas fundidas de Olocuilta" de Weyl (1957) que van variando de 1.81 ± 0.22 y 1.77 ± 0.22 Ma (K/Ar) (Lexa et al., 2011). Si estas dataciones K-Ar son correctas, las ignimbritas serían posteriores al domo. Se tratan de ignimbritas soldadas, de color rosado, ricas en pómez y de composición riolítica (70.3 % SiO_2). Estas ignimbritas fueron relacionadas por William and Meyer-Abich (1953, 1955) y Meyer-Abich (1956) con la primera erupción importante en el arranque evolutivo de la caldera de Ilopango, que produjo un volumen de 7-10 km^3 de material ignimbrítico (Weyl, 1957). Para que esa ase-

veración sea precisa y obtener una buena correlación, será necesario realizar estudios radiométricos por el método Ar^{40}/Ar^{39} a las ignimbritas de Olocuilta.

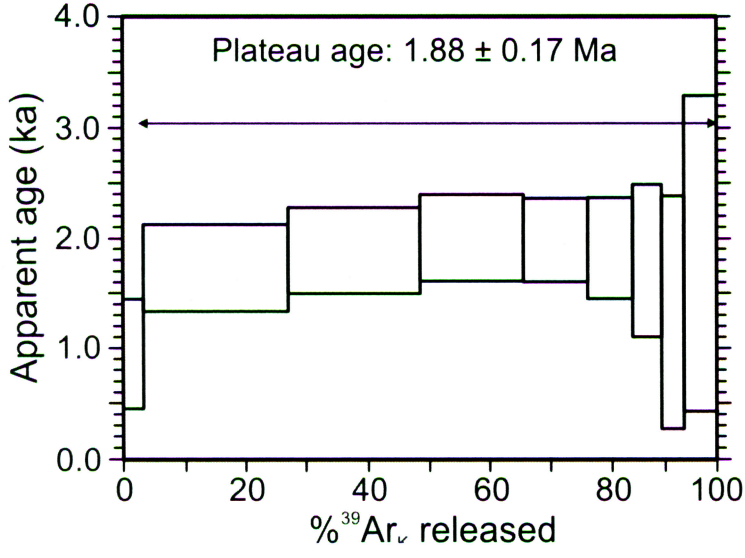


Figura 15.
Diagrama del espectro de edad $^{40}Ar/^{39}Ar$ de la cúpula El Güegüecho, mostrando la edad de meseta (s ± 2 incertidumbre) obtenida a partir del experimento de calentamiento gradual. Las flechas indican los pasos que se utilizan para determinar la edad meseta.

9. Crecimiento y evolución del domo

Cuando una lava viscosa está en ascenso hacia la superficie es muy probable que encuentre agua subterránea o superficial en su camino. Tal encuentro llega a producir reacciones muy explosivas impulsadas por el choque térmico extremo, entre el agua y el magma, dando como resultado una secuencia de depósitos piroclásticos gobernada por distintos mecanismos eruptivos. Los piroclastos de los puntos de afloramientos de la tabla 1 (en anexo) y en figura 4 (2, 3, 5, 9, 10, 11, 12, 14 y 15) representan el cimiento sobre el que se apoya, se desarrolla y crece la cúpula del domo de lava rico en sílice. Cuando un nuevo volcán, de este tipo, se manifieste desde la profundidad, comenzará a ejercer presión en superficie, la cual será temporalmente amortiguada y canalizada a través de la apertura de fallas nuevas o existentes (figura 16).

9.1 Depósitos piroclásticos del domo

Cuando la presión dentro de la cámara magmática excede la presión de confinamiento, esta cae en sobrepresión. Cuando la sobrepresión es mayor que la presión litostática, el magma comenzará a purgarse por medio de diques y mantos que se instalan en la roca encajante. Del dique se separa la fase gaseosa constituida en su mayor parte por vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2) y otros gases. Los gases se filtran a lo largo de alguna falla y en la cercanía de la superficie esos gases encuentran un acuífero somero. Ese contacto provoca un choque térmico que evaporiza repentinamente el acuífero, teniendo lugar una explosión freática con escape de vapor y surgimiento de fumarolas en la superficie del terreno (Schmincke, 2004; Francis & Oppenheimer, 2004). Esta etapa se caracteriza por mucha actividad sísmica alrededor de la boca eruptiva, la que se intensificó con el ascenso del magma viscoso (Hale & Wadge, 2008). El dique de magma caliente, en su ascenso, penetra con dificultad, ejerciendo presión y empuje hacia arriba, erosionando y ampliando el conducto.

Más hacia abajo, en el plano de falla, las burbujas del magma que provienen de la exsolución de los gases del magma durante el ascenso del dique se desplazan hacia arriba y experimentan crecimiento por expansión de las paredes de las vesículas. Esto es debido a la descompresión en la parte superior del dique de lava (figura 16). El crecimiento de las vesículas puede producir una espuma que consiste en burbujas uniformemente espaciadas, las cuales forman un magma pumítico con la presencia de volátiles, antes de ser fragmentadas en pómez y en partículas de cenizas por expansión, mientras se mueven hacia arriba en el conducto (Heiken & Wholetz. 1991). Capitas de pómez de 5 a 15 cm de espesor se han encontrado intercaladas en los flujos piroclásticos ricos en pómez y riolita, ambos juveniles, en la secuencia piroclástica subyacente al domo en el caserío La Esperanza (figura 4, punto 2). El pómez porfírico tiene vesículas finas con aspecto de tubos que fueron estiradas antes de la erupción, durante el flujo paralelo a las paredes del dique, tal como lo observó Fink (1983) en las obsidianas riolíticas del domo Little Glass Mountain en California, USA. La pómez tubular además refleja baja viscosidad y una alta razón de flujo dentro del ascenso del magma, también representa la fracción del magma fundido que alcanzó la superficie (Heinken & Wholetz, 1987). Instantáneamente, esa columna eruptiva evolucionó a una columna vulcaniana. Basado en la presencia de capitas de pómez grueso y vesiculado, de caídas intercaladas entre flujos piroclásicos en el caserío La Esperanza, además de la

presencia de una capa de pómez en la base de una secuencia piroclástica, en el cantón El Rodeo (figura 6B), se asume que en la base de los afloramientos en profundidad debe haberse depositado una capa de pómez con la que se inició la erupción explosiva que precediera el emplazamiento del domo, tal como fuera reportado para el domo Little Glass Mountain por Fink (1983), y más tarde por Heiken & Wholetz (1987). Cuando el magma entra en contacto con las aguas del acuífero somero, se produce la interacción agua-magma y tiene lugar la explosión y erupción freatomagmática de la que se generan oleadas piroclásticas (figura 16B). Durante todo el periodo en que se depositaron las tefras, se produjo una actividad cíclica vulcaniana debido al ascenso magmático y a las explosiones que ayudaron a limpiar la boca eruptiva para proveer el paso al nuevo magma (Heiken & Wholetz, 1991). Las tefras que precedieron al emplazamiento del domo yacen extendidas alrededor del centro de emisión (figura 17).

Al momento del contacto de la lava viscosa con el acuífero se llevó a cabo en distintos momentos y en diferentes puntos en un terreno inclinado, causando diferencias en la intensidad del contacto agua-magma, diferencias que se observan en las distintas secuencias piroclásticas (figuras 5 y 7A-B). La rápida evaporización del acuífero interrumpe la interacción agua-magma, permitiendo que la columna eruptiva se levante y con ella tuvo lugar los depósitos de caída de pómez (figura 6B). Sin embargo, esta columna no estuvo sostenida, originando frecuentes colapsos con la consecuente formación de depósitos de flujos piroclásticos. Por momentos, esta columna se recupera y cesan los flujos piroclásticos, depositando capas delgadas de pómez grueso con vesículas tubulares entre los flujos piroclásticos gruesos (figuras 5 y 7A-B). El acuífero se recupera de forma intermitente y sus aguas interactúan de esa manera nuevamente con el magma, produciendo fragmentación magmática de forma cíclica, especialmente hacia el final de esta etapa, dando así origen a oleadas piroclásticas de granulometría muy fina, laminadas, entre las capas de flujos de cenizas, de un aspecto bandeado y localmente con generación de estructuras cruzadas (figuras 5A-B y 16B).

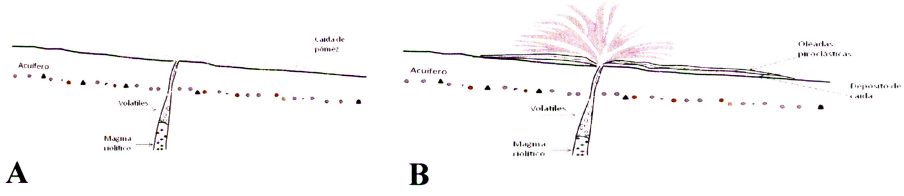


Figura 16.
Erupciones explosivas asociadas al domo. A) Inicio de la erupción con el contacto de la fase gaseosa constituida por los volátiles: vapor de agua, SO_2 y CO_2 y otros en menor proporción. Estos gases presurizados, al vencer la resistencia confinante producen la explosión expulsando el material de la roca encajante, el que depositan sobre el terreno inclinado. Sobre estos se deposita una capa vulcaniana de pómez. B) El magma entra en contacto con agua superficial y produciendo una espontánea explosión con fragmentación instantánea del magma, generando oleadas piroclásticas de granulometría fina.

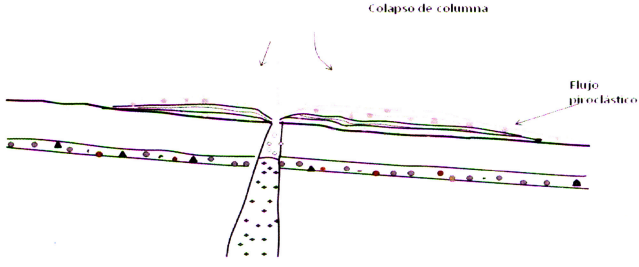


Figura 17.
Secuencia de delgados flujos piroclásticos y a veces de espesores moderados y textura gruesa.

9.1.2 Características físicas de las lavas

Para la formación de domos es muy importante el alto contenido de SiO_2 en las lavas; la existencia de gases, principalmente el H_2O; la cantidad de la fracción sólida en el fundido y la temperatura. Todos ellos tienen cierta in-

fluencia en la viscosidad del magma. El bandeado de las lavas félsicas es generado en el conducto, en la cercanía con la base del domo, donde los esfuerzos de cizalla experimentan una nueva lava entrando al domo y la lava existente es más resistente, debido a la presencia de cristales que hacen incrementar la viscosidad. Por otro lado, el régimen de crecimiento del domo dependerá de la tasa de extrusión, de la viscosidad dentro del conducto, la cual es fuertemente controlada por la pérdida de volátiles (magmas secos tienen alta viscosidad) y el crecimiento de cristales en la parte superior del conducto (Fink, 1983; Yokoyama, 2005; Hale, 2008). Las lavas riolíticas del cerro El Güegüecho tienen diferentes capas, con distintas cantidades de cristales, siendo que las dos capas analizadas, de bajo a moderado contenido de fenocristales + microfenocristales, es de 12 y 19 %. Debido a la cristalinidad del magma en ascenso en el conducto, se generaron presiones que dan lugar a esfuerzos de cizalla que, al ser extruidas, formaron lavas bandeadas (Fink, 1983; Hale &Wadge, 2008; Hale, 2008). Las bandas o rampas mejor definidas son aquellas donde más fuerte han sido los esfuerzos de cizalla, que corresponden a las partes de mayor deformación, siendo a su vez de mayor debilidad con surgimiento de discontinuidades, las cuales son las zonas más vulnerables a la meteorización (Fink, 1983; Hall, 2008; Hale & Wadge, 2008). A estas zonas son a las que se refiere Hale & Wadge (2008) como bandas de cizallamiento y son las responsables del establecimiento del régimen de crecimiento exógeno.

9.2 Emplazamiento y crecimiento del domo

El magma silícico del dique que logró llegar hasta la boca eruptiva comenzó a salir a la superficie, al parecer con baja tasa de extrusión para formar una cúpula, debido a la alta viscosidad que se manifiesta a través de su fuerza de cizalla, obligando a formar paredes empinadas. El continuo empuje del dique sobre la capa superior del terreno produjo constante sismicidad local y deformación en el terreno, que probablemente indujo cierto levantamiento a su alrededor y deformó el sector del acuífero o se produjo algún sellamiento en este, cesando la previa interacción agua-magma. Esta interrupción del contacto agua-magma, hizo posible una fase eruptiva de tipo efusivo (figura 18). El domo creció asimétricamente desde el inicio porque fue extruido sobre una ladera con suave pendiente de la caldera de Ilopango. Debido a que las lavas riolíticas tienen moderado porcentaje de cristalización, alta viscosidad, baja tasa de extrusión y más baja temperatura desarrollan en la parte superior del

conducto discontinuidades internas y son extruidas a la superficie en un régimen exógeno (Hale & Wadge, 2008).

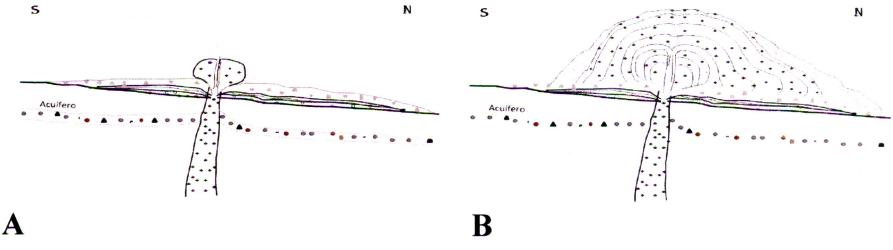


Figura 18.

Esquemas de la fase efusiva del domo.

A) Surgimiento de la fase efusiva sobre el depósito piroclástico, con la presencia de fumarolas en la boca eruptiva y en los laterales.

B) Desarrollo completo del domo con la formación de lóbulos que le dan el aspecto simétrico y en el entorno el depósito de la brecha.

9.2.1 El domo El Güegüecho y relación estratigráfica

El domo El Güegüecho se localiza en la parte occidental del grupo de volcanes ubicados en San Pedro Perulapán. Es el más alto y de mayor volumen (1.557 km^3) de todos ellos. No se han hecho análisis petrográficos, químicos ni radiométricos en los volcanes adyacentes: Miraflores, La Bolsa y Huiziltepeque; esto naturalmente dificulta cualquier intento de correlación. Sin embargo, se pudo observar que el cono de lava Huiziltepeque está bastante conservado y sus lavas están algo frescas. No obstante, se observó mayor meteorización en las lavas del domo La Bolsa y un poco menos en Miraflores, pero ambos están mucho más meteorizados que el Huiziltepeque. A partir de estas observaciones se ha elaborado un esquema de edades relativas, el cual, en un futuro, podrá actualizarse cuando se tengan los análisis de laboratorio antes citados. Así, se puede resumir que el volcán más antiguo es El Güegüecho, seguido por La Bolsa y Miraflores; y el cono basáltico Huiziltepeque es considerado el más joven de ese grupo (figura 19). Todos ellos se han depositado sobre las Ti constituidas por los productos piroclásticos de la caldera de Ilopango más antiguos que TB4 (Frullani, 1989).

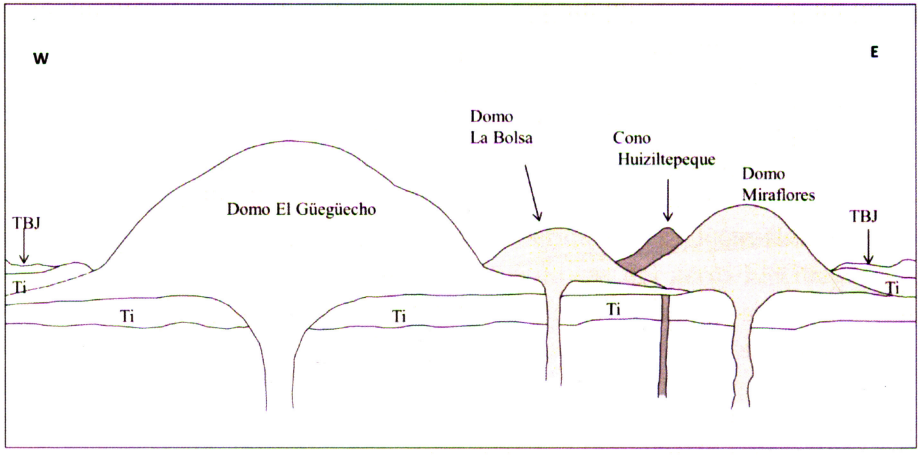


Figura19.
Esquema mostrando el complejo volcánico Lomas de San Pedro, ubicado a 7 km al norte del borde caldérico de Ilopango, donde yacen los domos: El Güegüecho, La Bolsa y Miraflores y el cono Huiziltepeque. Este complejo yace sobre los depósitos antiguos de la caldera de Ilopango constituidos por ígnimbritas y depósitos de caída de las Ti. Sobre estas yacen las tefras de TBJ y lentes pequeños aislados de TB4.

9.3 Tectónica y deformación del domo

El complejo volcánico San Jacinto, situado al extremo occidental de la caldera de Ilopango, es mucho más joven que el domo El Güegüecho. Este complejo está ubicado en el interior de la caldera Planes de Renderos y cuenta con dos domos de lavas dacíticos y un cono andesítico. Genéticamente está relacionado con reactivación de la caldera de Planes de Renderos, como lo sostiene Frullani (1989) y Lexa et al. (2011), la cual está contiguo y al occidente de la caldera de Ilopango. Los domos del complejo volcánico San Jacinto, estudiado por Lexa et al. (2011), cuyo domo más antiguo (NE) con 360 ± 0.040 ka (K/Ar) están muy fallados y algo meteorizados; el domo situado al occidente con 340 ± 0.066 ka (K/Ar), está menos fallado. El cono andesítico San Jacinto con 270 ± 0.17ka (K/Ar) no evidencia deformación por fallas. Con esto se infiere que la actividad tectónica podría estar relacionada con la formación de la cuenca *"pull-apart"* y que facilitó el emplazamiento de domos y conos volcánicos desde el pleistoceno; dicha actividad se ha extendido hasta el holoceno (Boratoux et al. 2004; Garibaldi et al., 2011), pasando por períodos de calma tectónica.

Posteriormente al emplazamiento del domo El Güegüecho, una actividad tectónica de tipo extensional produjo fallamientos de rumbo NS y NE, y en menor escala EO, dividiendo en varios bloques al domo y provocando desplazamientos normales, modificando así su forma original. Debido a esta afectación tectónica, se redujo su elevación (figura 20B). Después esos bloques fueron expuestos a la meteorización y erosión, tomando formas un poco más redondeadas, que ahora dan aspecto de cerros independientes. Desde el pleistoceno superior, sobre la superficie irregular formada por esos bloques fallados, se han depositado varias capas de cenizas de las erupciones explosivas de la caldera de Ilopango; sin embargo, no se han encontrado registros de su existencia debido a la erosión. Solamente se han encontrado pocos lentes pequeños de pómez de TB4 y amplios depósitos de TBJ. Varios manantiales tienen salida en zonas falladas y varios ríos recorren a lo largo de fallas y drenan el macizo rocoso en dirección norte. El principal sistema de fallas NS que lo ha afectado por esfuerzos extensivos de rumbo EO, ha provocado una reducción en la altura original que pudo haber tenido el cerro. El seccionamiento por fallas geológicas de este macizo ha originado pequeños bloques con cimas ligeramente redondeadas por erosión, formando cerritos alargados (figura 20).

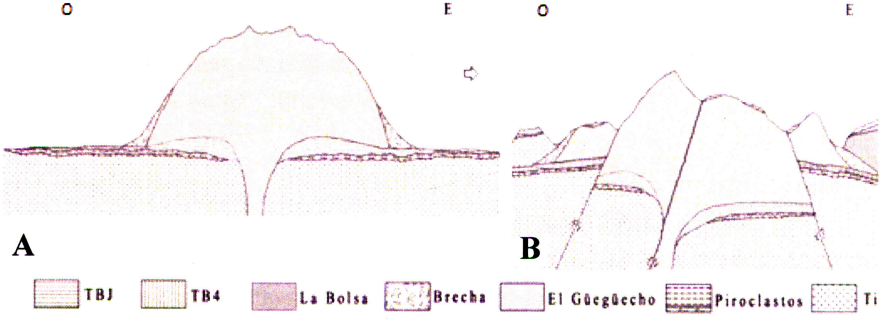


Figura 20.
Esquema de la destrucción del domo.
A) Situación inicial del emplazamiento del domo.
B) Situación actual después de la actividad tectónica extensional sobre el domo.

10 Peligros y recursos asociados a los volcanes monogenéticos

El sector norte, entre San Pedro Perulapan-Cojutepeque-San Rafael Cedros (figura 3), tiene muchos volcanes monogenéticos de distintas edades, entre los cuales se encuentra, al parecer, el más antiguo: El Güegüecho. Estos volcanes ya no podrán tener erupción nuevamente, pero con ese sector, de unos 180 km^2, por encontrarse dentro de la cuenca *"pull-apart"* (figura 2), podría activarse eventualmente la cámara magmática del Ilopango y canalizar la salida de magma por alguna de esas fallas existentes o abrirse una nueva.

10.1 Explosividad inicial

La peligrosidad de los volcanes monogenéticos está asociada principalmente a la explosividad que ocurre durante la erupción de un cono de escorias de tipo estromboliano. En el caso de los domos, a veces pueden tener asociadas erupciones explosivas previas a su emplazamiento, como fue el caso de El Güegüecho. Los depósitos piroclásticos se asocian a estas estructuras y pueden extenderse a su alrededor por pocos kilómetros de distancia. Para el caso del surgimiento del domo Islas Quemadas, en el interior del lago de Ilopango, de diciembre de 1879 a marzo de 1880 (Rockstrock, 1880; Goodyear, 1880). Newhall & Melson (1983), indicó para las Islas Quemadas, un índice de explosividad volcánica (VEI) igual a 3. Considerando que el domo El Güegüecho tiene mayor volumen (1.557×10^6 m^3), además de tener asociada erupciones explosivas previas al crecimiento, se le estima para este trabajo un VEI = 4.

10.2 Sismicidad

Otro peligro importante es la alta sismicidad que acompaña, desde que el magma busca la salida a la superficie hasta el ascenso y crecimiento del domo. Durante todo este proceso son frecuentes los enjambres sísmicos de poca profundidad, por eso, el radio de influencia de tal sismicidad es limitada a pocos kilómetros de la boca eruptiva. La sismicidad puede tener una duración de hasta más de 5 años, tal como fue el caso del domo Unzen en Japón, que se desarrolló entre 1991-1995, período en que se registraron más de 50,000 sismos superficiales, siendo el de mayor magnitud de 2.9 con profundidad hypocentral de < 1.5 km, y cuyo volumen fue mucho menor que 1 km^3; su ubicación, cercano a la boca eruptiva (Umakoshi et al., 2008). Debido a que en los alrededores de la caldera de Ilopango hay varios municipios, y como la

distribución de estos volcanes está en el interior, en la periferia y en los alrededores de la caldera, la posibilidad del surgimiento de un nuevo volcán, ya sea un cono de escoria o un domo, puede ocurrir, teniendo una amplia área para manifestarse y a más de un municipio para afectar.

10.3 Recursos geoarqueológicos

Los volcanes monogenéticos también representan una oportunidad para el desarrollo turístico y cultural. En agosto de 2013 se tuvo el hallazgo de un entierro pre-hispánico en la cima del domo riolítico El Carmen, en San Pedro Perulapán, Cuscatlán; se trata de un sacrificio maya cuyos restos fueron enterrados sobre el suelo de TB3 y posteriormente las tefras de TBJ cubrieron la superficie del cerro El Carmen, el cual se localiza cerca del borde caldérico noreste. Este hecho es de gran importancia histórica, arqueológica y antropológica, porque es posible que este tipo de costumbre se haya realizado en la mayoría de los volcanes monogenéticos alrededor del lago, como parte de una creencia maya. Esto se podría afirmar si se realizaran investigaciones sistemáticas con esa finalidad en las cimas de estos volcanes. Estudios geofísicos de poca penetración, como las técnicas de radar, gravimetría, sísmica de refracción y magnetometría, podrían ser herramientas útiles para facilitar este tipo de investigación arqueológica. Los conos de escoria, cuando no están meteorizados, funcionan como zonas de recarga de lluvias. En el caso de los domos, cuando están fracturados, sirven como canales para la circulación de las aguas meteóricas y suelen tener asociados manantiales de agua, tal como ocurre con los manantiales en El Güegüecho y El Carmen.

11 Conclusiones

- La composición química de la lava es de 73.17 % de SiO_2, y por radiometría Ar^{40}/Ar^{39} se determinó que la edad del domo es 1.88 ± 0.17 Ma, con un volumen de DRE = 1.5 km^3. La altura alcanzada por el domo es 927 msnm y sobresale de su entorno 310 m, permitiendo una amplia vista panorámica a su alrededor y sobre los otros volcanes. Una datación radiométrica y química total de rocas a los otros volcanes del complejo Lomas de San Pedro sería conveniente para determinar cronológicamente las edades absolutas y sus composiciones químicas.

- Debido a que las lavas riolíticas de El Güegüecho tienen moderado porcentaje de cristalización, estas tienen alta viscosidad y baja tasa de extrusión; características que en el magma hacen que se produzca una zona de altos esfuerzos de cizalla, por eso, las lavas desarrollaron, en la parte superior del conducto, discontinuidades internas y son extruidas a la superficie en un régimen exógeno.

- La lava del domo posee matriz vítrica en proceso de desvitrificación, originando el surgimiento de cristalización incipiente a través de muchos pequeños centros de cristalización de distintos tamaños. Estos centros son las esferulitas (calcedonia), caracterizadas por la extinción ondulante que surge debido a que los cristales individuales están orientados radialmente. La matriz vítrica muestra además la presencia de grietas arqueadas conocidas como perlitas. El estado de alteración de estas lavas es moderado y en su techo es algo avanzado.

- Los depósitos de pómez de caída y las oleadas piroclásticas son indicativos de erupciones explosivas, además del alto contenido de SiO_2 en roca total propio de magmas viscosos. Estos depósitos indican que el magma tuvo una fase gaseosa muy explosiva que originó una erupción de tipo vulcaniana con formación de una capa de caída de pómez inicial y de una columna eruptiva que dio origen a los flujos piroclásticos. Las intermitentes recuperaciones del nivel freático y el contacto del magma y el agua subterránea desencadenó erupciones freatomagmáticas, con producción de oleadas piroclásticas de granulometría muy fina y laminada. Esta fase explosiva fue interrumpida cuando el empuje del dique de magma deformó o impermeabilizó el acuífero somero y no hubo más interacción agua-magma, pasando a la fase efusiva y a la formación del domo. El VEI considerado para esta erupción es de 4.

- Las diferencias mostradas por las secuencias piroclásticas indican que no hubo una sola boca eruptiva al inicio de la erupción, sino que hubieron varias que aparecieron por la deformación del terreno inducida por el empuje del magma en un terreno inclinado.

- El domo El Güegüecho es riolítico y está entre los más evolucionados del sector norte de la caldera de Ilopango. La composición de los elementos trazas incompatibles de El Güegüecho son generalmente similares a las lavas y tefras de la caldera de Ilopango, pero tiene bajas concentraciones de elementos de tierras raras medios y pesados, por lo que consideramos que, si el fechamiento de las ignimbritas de Olocuilta asociadas a la formación de la caldera es correcto, este domo sería más viejo que esas ignimbritas. El domo, por su parte, pudo tener como fuente una vieja cámara magmática ubicada más hacia el norte y ahora abandonada por la migración magmática hacia el sur. Por tanto, el domo forma parte de un vulcanismo félsico del pleistoceno inferior contemporáneo y comagmático a escala local con el vulcanismo que generaría la formación de la caldera de Ilopango hace 1.81 Ma.

- El domo El Güegüecho se emplazó en la ladera norte de la caldera de Ilopango a lo largo de una falla que es parte de un sistema de fallas de una probable cuenca "*pull-apart*", en la que se encuentra la caldera de Ilopango. La formación de esa cuenca empezó probablemente a inicios del plioceno, facilitando el emplazamiento de domos y conos volcánicos en el pleistoceno; dicha actividad se ha extendido hasta el holoceno, pasando por períodos de calma tectónica.

12 Referencias

Alonso-Hernar, J.; Schereurs, G.; Martínez-Díaz, J.J.; Alvarez-Gómez, J.A. y Villamor, P. (2014). Neotectonic evolution of El Salvador Fault Zone. Insights from 4D analogue experiments. Poster.

Álvarez-Gómez, J.A.; Insua, J.M.; Capote, R.; Bejar, M.; Canora-Catalán, C., y Hernández, W. (2006). Geogaceta. 39. 3-6, ISSN:0213683X. pp 63-66.

Boratoux, L.; Guevara M.; Havlicek P.; Hernández W.; Hradecky P.; Kopackova, V.; Kvacek, Z.; Macek, D.; Novak, Z.; Novakaova, D.; Opletal, M.; Pullinger, C.; Rapprich, V.; Sebesta, J., y Vorel, T. (2004). "Estudio de los peligros Geológicos en los Departamentos de La Libertad, San Salvador y Cuscatlán. El Salvador". Servicio Geológico Checo, Praga. Servicio Nacional de Estudios Territoriales, El Salvador. 108 págs. Informe interno.

Canora, C.; Martínez-Díaz, J.J; Villamor, P.; Berryman, K.R.; Álvarez-Gómez, J.A.; Capote, R., y Díaz, M.M. "In Press. Structural evolution of the El Salvador Fault zone: an evolving fault system within a volcanic arc". *Journal of Iberian Geology.*

Carr, M.J., and Rose Jr, W.I. (1987). CENTAM-a data base of analyses of Central American volcanic rocks: Journal of Volcanology Geothermal Research, v. 33, pp. 239-240.

DeMets, C. (2001). "A new estimate for present-day Cocos-Caribbean plate motion: Implication for slip along the Central American volcanic arc". Geoph. Reas. Let. Vol. 0, No. 0, pp 1-4.

Dull, R.A; Southon, J.R.; and Sheets P.D. (2001). "Volcanism, Ecology and Culture. A reassessment of the volcano Ilopango TBJ eruption in the Southern Maya Realm. Latin American Antiquity". Vol. 12, Number 1, Society for American Archeology.

Dull, R.A. (2004). "Lessons from the mud, lessons from the Maya: Paleoecological records of the Tierra Blanca Joven eruption". *In* Rose, W.; Bommer, J.J.; López, D.L.; Carr, M.J. and Major, J.J. eds. Natural Hazards in El Salvador. The Geological Society of America. Special paper 375.P.237-244.2004.The Geological Society of America.

Fink, J.H., (1983). Structure and emplacement of a rhyolitic obsidian flow: Little Glass Mountain, Medice Lake Highland, northern California. Geological Society of America Bulletin, v. 94, pp. 362-380.

Fisher, R., and Schmincke, H.U. (1984). *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag. p 472.

Francis, P., and Oppenheimer, C. (2004). *Volcanoes*. Oxford University Press. P 521.

Frullani, A. (1989). "Geologia dell área Metropolitana di San Salvador". Attidelle Conferenze di geotécnica di Torino. Politecnico di Torino. Italia. pp 1-37.

Garibaldi, N.; Tikoff, B.; Peterson, D.E.; Montz, W.J., and Hernández, W. (2011). "En echelon segmentation in El Salvador magmatic arc: Fault characterization from the San Salvador extensional step-over". Master thesis, University of Wisconsin-Madison. USA. pp 69-132.

Garrison, J.M.; Reagan, M.K., and Sims, K.W.W. (2012). "Dacite formation at Ilopango Caldera, El Salvador: U-series disequilibrium and implications for petrogenetic processes and magma storage time: Geochemistry, Geophysics, Geosystems", v.13, Q06018, doi: 10.1029/2012GC004107

Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes: A Practical Guide*. 1st edition. Blackwell Publishing. London. p 428.

Goodyear, W.A. (1880). "Earthquake and volcanic Phenomena. December 1879 and January 1880. Republic of El Salvador. Central America". Star & Herald Office. Panama. pp 56.

Hale, A.J. (2008). "Lava Dome Growth and Evolution with an Independently Deformable Talus". *Geophysical Journal International, 714*, pp 391-417.

Hale, A.J., and Wadge, G. (2008). "The transition from endogenous to exogenous growth of lava domes with de development of shear bands". *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 171*. pp 237-257.

Heiken, G. and Wholetz, K. (1987). "Tephra deposits associated with silicic domes and lava flows". Geological Society of America, Special Paper 212. pp 55-76.

Heiken, G. and Wholetz, K. (1991). "Fragmentation processes in explosive volcanic eruptions". pp 19-26. In Fisher, R.V and Smith, G.A. (1991). Sedimentation in Volcanic settings, SEPM. Special paper No. 45. ISBN 0-918985-89-7

Jicha, B.R.; Rhodes, J.M.; Singer, B.S., and García, M.O., (2012), "40Ar/39Ar geochronology of submarine Mauna Loa volcano, Hawaii". *Journal of Geophysical Research 117*, B09204, doi:10.1029/2012JB009373.

Kutterolf, S.; Freundt, A., and Pérez, W. (2008b). "Pacific offshore record of plinian arc volcanism in Central America: Tephra volumes and erupted masses". Volume 9, Number 2, Q02S02, doi:10.1029/2007GC001791

Le Bas, M.J.; Le Maitre, R.W.; Streckeisen, A., and Zanettin, B., (1986). "A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram": *Journal of Petrology*, v. 27, pp 745-750.

Lexa, J.; Sebesta, J; Chávez, A.; Hernández, W., and Pécskay, Z. (2011). "Geology and volcanic evolution in the southern part of San Salvador Metropolitan Area". *Journal of Geosciences*, 56 (2011), pp 105-140. Czech Republic.

Lockwood, J. and Hazlett, RW. (2010). *Volcanoes: Global Perspectives*. Blackwell publishing. pp 539. London.

Mann, C.P.; Stix, J.; Vallance, J.W., and Richer, M. (2004). Subaqueous intracaldera volcanism, Ilopango caldera, El Salvador, Central America. In: *Natural Hazards in El Salvador*, Rose, W.I. et al. (eds.): Geological Society if America Special Paper, v. 375, pp 159-174.

McPhie, J.; Doyle, M., and Allen, R. (1993). "Volcanic textures: A guide to the interpretation of textures in volcanic rocks". Centre for Ore Deposit and Exploration Studies. University of Tasmania. pp 196.

Martínez-Díaz, J.J.; Álvarez-Gómez, J.A.; Benito, B., and Hernández, D. (2004). "Triggering of destructive earthquakes in El Salvador". Geol. Soc. America. v. 32; no 1. pp 65-68.

Meyer-Abich, H. (1956). "Los volcanes activos de Guatemala y El Salvador. América Central. Anales del Servicio Geológico Nacional de El Salvador". Boletín N° 3. Ministerio de Obras Públicas, República de El Salvador. 102 p.

Newhall, C.G., and Melson, W.G., (1983). "Explosive activity associated with growth of volcanic domes. Journal of Volcanology and Geothermal Research", v. 17, pp 111-131. In M.F. Sheridan and F. Barberi. Editors. Explosive Volcanism. J. Volcanol. Geotherm. Res. 17: 111-131.

Rockstrock, E. (1880). "Estudio de los fenómenos volcánicos en el Lago de Ilopango, de la República de El Salvador". Comisión del Instituto Nacional de Guatemala, pp 49.

Sebesta, J. y Chávez, J. (2011). "Mapa Geomorfológico de la Subregión Metropolitana de San Salvador". Oficina de Planificación del Area Metropolitana de San Salvador.

Sheets, P.D. (1979). "Maya recovery from volcanic disasters Ilopango and Cerén". *Archaeology*, V. 32, N° 3. pp. 32-42.

Staller, A. (2014). Modelación de las deformaciones corticales en El Salvador (Centroamérica) mediante la integración de datos geodésicos con (GPS), geológicos y sismológicos. Universidad Politécnica de Madrid, tesis doctoral. 222 p.

Sun, S.-s., and McDonough, W.F. (1989). "Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes": Geological Society, London, Special Publications, v. 42, No. 1, pp. 313–345, doi: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

Umakoshi, K.; Takamura, N.; Shinzato, N.; Uchida, K.; Matsuwo, N., and Shimizu, H. (2008). "Seismicity associated with the 1991-1995 dome growth at Unzen Volcano, Japan". *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 175. pp 91-99.

Wadge, G.; Ryan, G., and Calder, E.S. (2009). "Clastic and core lava components of a silicic lava dome". Geological Society of America.V37; no. 6. pp 551-554.

Weyl, R. (1957). "Las Tobas fundidas de la Cadena Costera". Revista *Comunicaciones* del Instituto Tropical de Investigaciones Científicas. Universidad de El Salvador. pp 1-20.

Williams, H., and Meyer-Abich (1953). El origen del lago de Ilopango. Revista *Comunicaciones* del Instituto Tropical de Investigaciones Científicas. San Salvador. Año II, No 1, pp 1-8.

Williams, H., and Meyer-Abich (1955). "Volcanism in the southern part of El Salvador with particular reference to the collapse basins of lakes Coatepeque and Ilopango". University of California. Publin Geol. Sci., Vol. 32, No 1, pp 1-64, Berkeley, Los Ángeles.

Yokoyama, I. (2005). "Growth rates of lava domes with respect to viscosity of magmas". *Annals of Geophysics*, vol. 48, No 6. pp 957-971.

Anexos

Tabla 1.
Lista de afloramientos

No.	Coordenadas		Lugar
	Long. W	Lat. N	
1	-89.00653	13.79608	Ctón La Esperanza
2	-89.01506	13.79590	Ctón La Esperanza, sector La Escuela
3	-89.01234	13.76244	Ctón El Espino, Crío El Cerro
4	-89.01310	13.77200	El Paraíso Arriba
5	-89.01254	13.75733	Ctón El Espino, Sector La Cruz
6	-89.022525	13.77344	Ctón El Paraíso Abajo
7	-89.01302	13.77569	Domo El Güegüecho. Rampa de lava
8	-89.00235	13.77109	Agua Buena
9	-89.03741	13.77670	Ctón El Rodeo
10	-89.03281	13.77794	Ctón El Rodeo. Crío. Los Beltrán
11	-89.03089	13.77693	Ctón El Rodeo
12	-89.02882	13.78596	Ctón El Rodeo. Bomba Acmasa
13	-89.02216	13.79516	Ctón La Esperanza
14	-89.02724	13.77992	Ctón El Rodeo
15	-89.03491	13.77949	Ctón El Rodeo Crio. Los Beltrán
16	-89.00202	13.79581	Ctón Tecoluco Arriba

Tabla 2.

Datos químicos del domo El Güegüecho, San Pedro Perulapán, Cojutepeque

Compuesto	%
SiO_2	72.65
TiO_2	0.187
Al_2O_3	13.40
FeO*	1.64
MnO	0.070
MgO	0.30
CaO	1.54
Na_2O	3.39
K_2O	3.73
P_2O_5	0.016
Sum	***96.93***
LOI	2.36

(XRF)	
Elemento	**ppm**
Ni	0.00000240
Cr	0.00000200
V	0.00001420
Ga	0.00001270
Cu	0.00000520
Zn	0.00003700

(ICP-MS)	
Elemento	**ppm**
La	0.00001573
Ce	0.00002565
Pr	0.00000338
Nd	0.00001210
Sm	0.00000241
Eu	0.00000056
Gd	0.00000200
Tb	0.00000033
Dy	0.00000207
Ho	0.00000043
Er	0.00000131
Tm	0.00000022
Yb	0.00000150
Lu	0.00000026
Ba	0.00126841
Th	0.00000500
Nb	0.00000340
Y	0.00001247
Hf	0.00000326
Ta	0.00000034
U	0.00000227
Pb	0.00000838
Rb	0.00008504
Cs	0.00000324
Sr	0.00017326
Sc	0.00000249
Zr	0.00011473

RECOPILACIÓN DE LAS INVESTIGACIONES PUBLICADAS 2008-2014

PRODUCTO	COLECCIÓN
Curso de Derecho Penal Salvadoreño. Parte General Volumen III. Teoría de la ley penal. Miguel Alberto Trejo Escobar	Colección Jurídica
Etnografía de salvadoreños migrantes en Brentwood y Hempstead Nueva York Jorge Arturo Colorado Berríos	Facultad de Ciencias Sociales
Proyecto de registro y reconocimiento de sitios arqueológicos históricos de El Salvador (PAHES-UTEC) José Heriberto Erquicia Cruz	Facultad de Ciencias Sociales Escuela de Antropología
En defensa de la Patria. Historia del Conflicto Armado en El Salvador 1980-1992 General Humberto Corado Figueroa	
Las controversiales fichas de fincas salvadoreñas. Antecedentes, origen y final. José Luis Cabrera Arévalo	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social. Escuela de Antropología
Recopilación Investigativa. Tomo I	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Recopilación Investigativa. Tomo II	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Recopilación Investigativa. Tomo III	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Apuntes sobre Mercadeo moderno José A. Exprúa	
El Estado Constitucional Dr. Mario Antonio Solano Ramírez	Colección Jurídica
Las agrupaciones ilícitas como delincuencia organizada Leonardo Ramírez Murcia	Colección Jurídica
La mujer dormida. Novela corta Eduardo Badía Serra	Colección Literaria
Koot. Revista de museología No. 1	Museo Universitario de Antropología
De la ilusión al desencanto. Reforma económica en El Salvador 1989-2009 Juan Héctor Vidal	Colección Ciencias Sociales
Casa Blanca Chalchuapa, El Salvador. Excavación en la trinchera 4N Nobuyuki Ito	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social. Escuela de Antropología

Recopilación Investigativa 2009. Tomo 1	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Recopilación Investigativa 2009. Tomo 2	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
Recopilación Investigativa 2009. Tomo 3	Vicerrectoría de Investigación y Proyección Social
El nuevo proceso civil y mercantil salvadoreño	Colección Jurídica
Koot. Revista de museología No. 2	Museo Universitario de Antropología
Discursos en el tiempo para graduados y otros temas educativos José Adolfo Araujo Romagoza	
Recopilación Investigativa 2010	Vicerrectoría de Investigación
Recopilación Investigativa 2010	Vicerrectoría de Investigación
Recopilación Investigativa 2010	Vicerrectoría de Investigación
Decisiones Dr. Jorge Bustamente	
Compendio Gramatical. José Braulio Galdámez	
Foro económico: El Salvador 2011	Colección Ciencias Sociales
La violencia social delincuencial asociada a la salud mental en los salvadoreños. Investigación Dr. José Ricardo Gutiérrez Quintanilla	Vicerrectoría de Investigación
Recopilación de investigación 2011 Tomo I	Vicerrectoría de Investigación
Recopilación de investigación 2011 Tomo II	Vicerrectoría de Investigación
Recopilación de investigación 2011 Tomo III	Vicerrectoría de Investigación
Programa psicopreventivo de educación para la vida efectividad en adolescentes UTEC-PGR Ana Sandra Aguilar de Mendoza- Milton Alexander Portillo	Vicerrectoría de Investigación
El lenguaje delincuencial en El Salvador. Braulio Galdámez	
Medicina tradicional entre los indígenas de Izalco, Sonsonate, El Salvador Beatriz Castillo	Colección Ciencias Sociales
Contenido y proyección del anteproyecto de constitución política de 1950. Dr. Alfredo Martínez Moreno	Colección Jurídica
Revista Koot No 3 Dr. Ramón Rivas	Museo Universitario de Antropología

Causas de la participación del clero salvadoreño en el movimiento emancipador del 5 de noviembre de 1811 en El Salvador y la postura de las autoridades eclesiales del Vaticano ante dicha participación. Claudia Rivera Navarrete	Colección Investigaciones
Estudio Histórico proceso de independencia: 1811-1823 Tomo II Dr. José Melgar Brizuela	Colección Investigaciones
El Salvador insurgente 1811-1821 Centroamérica. Tomo III César A. Ramírez A.	Colección Investigaciones
Antropología en El Salvador. Recorrido histórico y descriptivo Dr. Ramón Rivas	Colección Ciencias Sociales
Representatividad y pueblo en las revueltas de principios del siglo XIX en las colonias hispanoamericanas Héctor Raúl Grenni Montiel.	Colección Investigaciones
Guía básica para la exportación de la Flor de Loroco, desde El Salvador hacia España, a través de las escuelas de hostelería del País Vasco. Álvaro Fernández Pérez	Colección Investigaciones
La regulación jurídico-penal de la trata de personas especial referencia a El Salvador y España Hazel Jasmin Bolaños Vásquez	Colección Investigaciones
Infancia y adolescencia en la prensa escrita, radio y televisión salvadoreña Camila Calles Minero Morena Azucena Mayorga	Colección Investigaciones
Participación científica de las mujeres en El Salvador Primera aproximación Camila Calles Minero	Colección Investigaciones
Mejores prácticas en preparación de alimentos en la micro y la pequeña empresa José Remberto Miranda Mejía	Colección Investigaciones No. 29
Evaluación de factores psicosociales de riesgo y de protección de violencia juvenil en El Salvador José Ricardo Gutiérrez Quintanilla	Colección Investigaciones No. 30
Historias, patrimonios e identidades en el municipio de Huizúcar, La Libertad, El Salvador José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina Ariana Ninel Pleitez Quiñónez	Colección Investigaciones No. 31
Condiciones socioeconómicas de preparación para la PAES de los estudiantes de Educación Media Saúl Campos Morán Paola María Navarrete	Colección Investigaciones No. 32

Inventario de las capacidades turísticas del municipio de Chiltiupán, departamento de La Libertad Lissette Cristalina Canales de Ramírez Carlos Jonatán Chávez Mejía Mario Antonio Aguilar Flores	Colección Investigaciones No. 33
Delitos relacionados con la pornografía en personas menores de 18 años. Especial referencia a las tecnologías de información y la comunicación como medio comisivo Hazel Jasmin Bolaños Vásquez Miguel Ángel Boldova Pasamar Carlos Fuertes Iglesias	Colección Investigaciones No. 34
Condiciones culturales de los estudiantes de educación media para el aprendizaje del idioma inglés Saúl Campos Morán Paola María Navarrete Julio Anibal Blanco	Colección Investigaciones No. 35
Valoración económica del recurso hídrico como un servicio ambiental de las zonas de recarga en las subcuencas del río Acelhuate José Ricardo Calles	Colección Investigaciones No. 36
Migración forzada y violencia criminal: Una aproximación teórico-práctica en el contexto actual Elsa Ramos	Colección Investigaciones No. 37
La prevención del maltrato en la escuela. Experiencia de un programa entre alumnos de educación media Ana Sandra Aguilar de Mendoza José Manuel Andreu Rodríguez María Elena Peña Fernández	Colección Investigaciones No. 38
Percepción del derecho a la alimentación en El Salvador. Perspectiva desde la biotecnología Carolina Lucero Morán Jeremías Ezequiel Yanes Densy Samuel Trejo Quintana	Colección Investigaciones No. 39

RECOPILACIÓN DE COLECCIONES
"CUADERNILLOS" 2008-2014

TITULO	COLECCIÓN
El método en la investigación. Breve historia del derecho internacional humanitario desde el mundo antiguo hasta el tratado de Utrecht Colección de Derecho No. 1 Dr. Jaime López Nuila Lic. Aldonov Frankeko Álvarez Ferrufino	Colección de Derecho
Modo de proceder en el recurso de casación en materias: civiles, mercantiles y de familia Colección de Derecho No. 2 Dr. Guillermo Machón Rivera	Colección de Derecho
La administración de justicia y la elección de los magistrados de la corte suprema de justicia luego de los acuerdos de paz Colección de Derecho No. 3 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez	Colección de Derecho
La Proyección Social una propuesta práctica Colección Cuaderno No. 1 Lic. Carlos Reynaldo López Nuila	Rectoría Adjunta
Hacia una nueva cultura jurídica en materia procesal civil y mercantil Colección de Derecho No. 4 Lic. Juan Carlos Ramírez Cienfuegos	Colección de Derecho
La educación: ¿derecho natural o garantía fundamental? Dr. Jaime López Nuila	Colección de Derecho
Realidad Nacional 1 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Realidad Nacional 2 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Realidad Nacional 3 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Realidad Nacional 4 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Realidad Nacional 5 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales

Realidad Nacional 6 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Realidad Nacional 7 Lic. Rene Edgardo Vargas Valdez Lic. Aldonov Frankeko Álvarez	Colección Ciencias Sociales
Obstáculos para una investigación social orientada al desarrollo Colección de Investigaciones Dr. José Padrón Guillen	Vicerrectoría de Investigación
Estructura familia y conducta antisocial de los estudiantes en Educación Media Colección de Investigaciones No. 2 Luis Fernando Orantes Salazar	Vicerrectoría de Investigación
Prevalencia de alteraciones afectivas: depresión y ansiedad en la población salvadoreña Colección de Investigaciones No. 3 José Ricardo Gutiérrez	Vicerrectoría de Investigación
Violación de derechos ante la discriminación de género. Enfoque social Colección de Investigaciones No. 4 Elsa Ramos	Vicerrectoría de Investigación
Diseño de un modelo de vivienda bioclimática y sostenible. Fase I Colección de Investigaciones No. 5 Ana Cristina Vidal Vidales	Vicerrectoría de Investigación
Importancia de lso indicadores y la medición del quehacer científico Colección de Investigaciones No. 6 Noris López de Castaneda	Vicerrectoría de Investigación
Situación de la educación superior en El Salvador Colección de Investigaciones No. 1 Lic. Carlos Reynaldo López Nuila	Vicerrectoría de Investigación
La violencia social delincuencial asociada a la salud mental. Colección de Investigaciones No. 7. Lic. Ricardo Gutiérrez Quintanilla	Vicerrectoría de Investigación
Estado de adaptación integral del estudiante de educación media de El Salvador Colección de Investigaciones No. 8 Luis Fernando Orantes	Vicerrectoría de Investigación
Aproximación etnográfica al culto popular del Hermano Macario en Izalco, Sonsonate, El Salvador. Colección de Investigaciones No. 9 José Heriberto Erquicia Cruz	Vicerrectoría de Investigación

La televisión como generadora de pautas de conducta en los jóvenes salvadoreños Colección de Investigaciones No. 10 Edith Ruth Vaquerano de Portillo Domingo Orlando Alfaro Alfaro	Vicerrectoría de Investigación
Violencia en las franjas infantiles de la televisión salvadoreña y canales infantiles de cable Colección de Investigaciones No. 11 Camila Calles Minero Morena Azucena Mayorga Tania Pineda	Vicerrectoría de Investigación
Factores que influyen en los estudiantes y que contribuyeron a determinar los resultados de la PAES 2011 Colección de Investigaciones No. 12 Saúl Campos Blanca Ruth Orantes	Vicerrectoría de Investigación
Responsabilidad legal en el manejo y disposición de desechos sólidos en hospitales de El Salvador Colección de Investigaciones No. 13 Carolina Lucero Morán	Vicerrectoría de Investigación
Obrajes de añil coloniales de los departamentos de San Vicente y La Paz, El Salvador Colección de Investigaciones No. 14 José Heriberto Erquicia Cruz	Vicerrectoría de Investigación
San Benito de Palermo: elementos afrodecendientes en la religiosidad popular en El Salvador. Colección de Investigaciones No. 16 José Heriberto Erquicia Cruz y Martha Marielba Herrera Reina	Vicerrectoría de Investigación
Formación ciudadana en jóvenes y su impacto en el proceso democrático de El Salvador Colección de Investigaciones No. 17 Saúl Campos	Vicerrectoría de Investigación
Turismo como estrategia de desarrollo local. Caso San Esteban Catarina. Colección de Investigaciones No. 18 Carolina Elizabeth Cerna, Larissa Guadalupe Martín y José Manuel Bonilla Alvarado	Vicerrectoría de Investigación
Conformación de clúster de turismo como prueba piloto en el municipio de Nahuizalco. Colección de Investigaciones No. 19 Blanca Ruth Galvez García, Rosa Patricia Vásquez de Alfaro, Juan Carlos Cerna Aguiñada y Oscar Armando Melgar.	Vicerrectoría de Investigación
Mujer y remesas: administración de las remesas. Colección de Investigaciones No. 15 Elsa Ramos	Vicerrectoría de Investigación

Estrategias pedagógicas implementadas para estudiantes de educación media Colección de Investigaciones No. 21 Ana Sandra Aguilar de Mendoza	Vicerrectoría de Investigación
Participación política y ciudadana de la mujer en El Salvador Colección de Investigaciones No. 20 Saúl Campos Morán	Vicerrectoría de Investigación
Estrategia de implantación de clúster de turismo en Nahuizalco (Propuesta de recorrido de las cuatro riquezas del municipio, como eje de desarrollo de la actividad turística) Colección de Investigaciones No. 22 Blanca Ruth Gálvez Rivas Rosa Patricia Vásquez de Alfaro Óscar Armando Melgar Nájera	Vicerrectoría de Investigación
Fomento del emprendedurismo a través de la capacitación y asesoría empresarial como apoyo al fortalecimiento del sector de la Mipyme del municipio de Nahuizalco en el departamento de Sonsonate. Diagnóstico de gestión. Colección de Investigaciones No. 23 Vilma Elena Flores de Ávila	Vicerrectoría de Investigación
Proyecto migraciones nahua-pipiles del postclásico en la Cordillera del Bálsamo Colección de Investigaciones No. 24 Marlon V. Escamilla William R. Fowler	Vicerrectoría de Investigación
Transnacionalización de la sociedad salvadoreña, producto de las migraciones Colección de Investigaciones No. 25 Elsa Ramos	Vicerrectoría de Investigación
Imaginarios y discursos de la herencia afrodescendiente en San Alejo, La Unión, El Salvador Colección de Investigaciones No. 26 José Heriberto Erquicia Cruz Martha Marielba Herrera Reina Wolfgang Effenberger López	Vicerrectoría de Investigación
Metodología para la recuperación de espacios públicos Colección de Investigaciones No. 27 Ana Cristina Vidal Vidales Julio César Martínez Rivera	Vicerrectoría de Investigación

Resumen Hoja de Vida

Walter Hernández

Walter Hernández es geólogo salvadoreño graduado de en Porto Alegre, Brasil en 1979. Hizo estudios de posgrado en Exploración Geotérmica en International School of Geothermics, Pisa, Italia en 1988. Hizo estudios de maestría Tecnologías Geológicas en la Universidad Politécnica de Madrid, en 2005. Ha participado en proyectos geotérmicos para generación de energía eléctrica, en geología de pozos geotérmicos. Como geólogo en proyectos hidroeléctricos en las fases de pre-factibilidad y factibilidad, además hidrogeológicos para abastecimiento de agua potable. Últimamente labora en el Observatorio Ambiental/MARN en peligros geológicos: movimientos de laderas y en volcanología física. Estudios de volcanes monogenéticos asociados a la caldera de Ilopango. De 2004 a 2014 docente de Geología para Arqueólogos y Geografía Física para estudiantes de arqueología en la Universidad Tecnológica de El Salvador e investigador en la misma universidad.

Guillermo E. Alvarado

Guillermo E. Alvarado Induni nació en Costa Rica. Obtuvo su bachillerato, licenciatura (mención honorífica) y maestría en Geología en la Universidad de Costa Rica, y su doctorado (summa cum laude) en la Universidad de Kiel, Alemania. Ha sido profesor de Geología en la Universidad de Costa Rica, en diversos cursos de Bachillerato, Licenciatura y Maestría en la Escuela de Historia y Geografía (1985 - 1989), la Escuela de Geología (1994 - 2010) y la Escuela de Antropología y Sociología (2003 - 2004, 2006), así como en la Universidad de Salta (Argentina) y en el Instituto Tecnológico del Cibao Oriental (2012 y 2014) en Cotuí (República Dominicana). Dirigió diez tesis de licenciatura y fungió como codirector y lector de varias tesis de maestría y doctorado. Alvarado es autor y coautor de 48 artículos en revistas indexadas publicadas en el exterior y de 71 artículos en revistas nacionales indexadas, además de 24 publicaciones en libros y de 199 resúmenes en congresos. Tiene en su haber 8 libros (tres en inglés), cuatro de ellos en coautoría; tres de los ellos con dos o más ediciones y reimpresiones. La mayoría de sus investigaciones se han enfocado hacia la geología de América Central, aunque posee investigaciones en Argentina, Ecuador y República Dominicana. Su trabajo se ha enfocado en los volcanes y las rocas ígneas, así como los peligros geológicos, la geología del Cuaternario y la historia de la Geología. La mayor parte de su labor profesional la ha realizado en los proyectos hidroeléctricos y geotérmicos, que ha investigado y desarrollado el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) desde su ingresó en 1984. Ha colaborado desde 1989 con la Comisión Nacional de Prevención de Riesgos y Atención de Emergencias (CNE). Además, es miembro de

la International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior (IAVCEI) y miembro fundador de la Asociación Latinoamericana de Volcanología (ALVO). Bautizado por algunos periodistas como "El Señor de los Volcanes", ha recibido reconocimientos por parte de la Universidad de Costa Rica (2003, 2010, 2012) y por el Colegio de Geólogos de Costa Rica en 1997, sobresaliendo el "Premio Geológico Nacional" 2009.

Brian Jicha

Brian R. Jicha nació en los Estados Unidos de América. Recibió su licenciatura en Geología (Graduado con honores) en la Universidad de Cleveland State, la Maestría y Doctorado en Geología en la Universidad de Wisconsin-Madison. Él es científico investigador asociado en la Universidad de Wisconsin-Madison donde dirige el laboratorio WiscAr. Jicha ha sido autor y co-autor de 56 artículos revisados por expertos desde 2003. Su investigación se centra en el uso de la datación radiométrica 40Ar / 39Ar, junto con el mapeo geológico detallado, la geoquímica y la estratigrafía para entender las historias eruptivas y evolución magmática de largo plazo de los arcos volcánicos activos. También investiga la iniciación de la subducción y el desarrollo de arcos de islas del circum-Pacífico desde el Eoceno. Es miembro de la Asociación Internacional de Vulcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI), la Unión Geofísica Americana (AGU), y de la Sociedad Geológica de América (GSA).

Luis Mixco

Luis Mixco es salvadoreño graduado de Ingeniero Civil en la Universidad Centroamericana Jose Simeón Cañas (UCA), en 2010. Hizo estudios de maestría en Administración de Empresas, en la UCA, 2014. Ha participado en proyectos de Reducción de Riesgos por amenazas naturales, específicamente, por deslizamientos de tierra. Ha sido el pionero en la modelación de lahares y flujos de escombros en los volcanes y cerros a lo largo del país. Ha participado en conferencias de peligro sísmico y alerta temprana por tsunamis. Actualmente, labora en el Observatorio Ambiental/MARN en el monitoreo de deslizamientos y eventos sismológicos; y en la generación de mapas de intensidad instrumental del terreno "Shakemaps" cuando ocurre un terremoto.

Editorial UTEC