

# Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, Chiapas, como fuente alterna de energía

*Uriel Arellano Contreras y Esteban Jiménez Salgado*

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58090, Mich. Correo: [uriel.arellano@cfe.gob.mx](mailto:uriel.arellano@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

El proyecto geotérmico del Chichonal se localiza al noroeste del estado de Chiapas. Está emplazado localmente en un basamento de cuatro unidades de origen sedimentario y edad del Jurásico al Terciario. Se considera un sistema volcánico-hidrotermal de los más recientes a nivel mundial. Su origen está relacionado con la interacción de las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica. Las dataciones más recientes por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de los productos volcánicos permiten definir seis unidades volcánicas: Somma, Domo SW, Domo Cambac, Domo Capulín, Domo NW y flujos piroclásticos del Holoceno, con edad de 276 mil años al Reciente. La deformación estructural observada permite distinguir dos tipos de deformación: dúctil y frágil. La secuencia sedimentaria se encuentra plegada y constituye los anticlinales de La Unión y Caimba, el sinclinal de Buena Vista y la deformación frágil de fallamiento tipo capa-capita. En las rocas volcánicas la deformación es de tipo frágil y consiste en fallas y fracturas, observándose claramente al NW del complejo volcánico. Desde el punto de vista estructural la actividad hidrotermal está controlada por los sistemas estructurales y por los contactos litológicos entre el paquete sedimentario y la unidad volcánica. Las manifestaciones termales consisten de manantiales, fumarolas y hervideros distribuidos en cuatro sectores del volcán. De acuerdo con la evaluación geoquímica de las manifestaciones, hay cuatro tipos de agua: sulfatada con pH ácido, sulfatada cálcica con pH neutro, clorurada ácida y clorurada sódica con pH neutro. El geotermómetro de Na/K arroja temperaturas de 230°C mientras que el geotermómetro de gases  $\text{H}_2/\text{Ar}$  indica temperaturas de 260°C. A partir del análisis estructural y geoquímico se definió una zona de interés geotérmico regida por el fallamiento que controla la distribución termal. El yacimiento geotérmico se considera que puede estar alojado en la secuencia sedimentaria de calizas. Las características termales en el área del complejo volcánico indican la existencia de una fuente de calor de alta temperatura susceptible de ser aprovechada para generar energía eléctrica como una fuente alterna de energía.

*Palabras clave:* Volcán Chichonal, estudio estructural, edades radiométricas, características geoquímicas, geotermometría.

## Geologic-structural assessment of the Chichonal volcanic complex, Chiapas, as alternative energy source

### Abstract

The Chichonal geothermal project is located in northwestern Chiapas. It is locally placed into a basement of four Jurassic-Tertiary sedimentary units and deemed one of the most recent volcanic-hydrothermal systems, worldwide. The origin of el Chichonal is related to the interaction of the Cocos and North America plates. The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  recent dating of its volcanic rocks allows us to define six volcanic units: Somma, SW Dome, Cambac Dome, Capulín Dome, NW Dome and Holocene pyroclastic flows—with ages varying from 276,000 years ago to Recent. Structural deformation is ductile and fragile. The sedimentary sequence is folded and gives place to La Unión and Caimba anticlines, Buena Vista syncline and a fragile faulting of the lit-par-lit type. For the volcanic rocks, the deformation consists of faults and fractures occurring NW of the volcanic complex. The hydrothermal activity is controlled by structural systems and the lithological contacts between

the sedimentary and volcanic series. Thermal manifestations include hot springs, fumaroles and steaming ponds in four zones of the volcano. There are four geochemical types of water: sulfated with acid pH, calcic-sulfated with neutral pH, acid-chloride and sodium-chloride with neutral pH. The Na/K geothermometer indicates bottom temperatures of 230°C, while the H<sub>2</sub>/Ar gas-geothermometer indicates 260°C. A main geothermal zone has been identified related to faults controlling the thermal distribution. The geothermal reservoir is thought to be hosted by the limestone sequence. Thermal features of the complex imply the presence of a high-temperature heat source capable to be used to generate electric energy as an alternative energy source.

*Keywords:* Chichonal volcano, structural study, radiometric dating, geochemical features, geothermometry.

## 1. Introducción

Debido a la necesidad de diversificar las fuentes tradicionales de generación de energía eléctrica y contribuir a su desarrollo, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) ha evaluado el potencial geotérmico preliminar de la zona del complejo volcánico del Chichonal.

Esta área ha sido objeto de un sinnúmero de estudios de diferente índole y propósito. Desde la década de los setenta se han realizado trabajos de exploración por parte de Petróleos Mexicanos. En esa misma época la CFE inicia un estudio de prospección geotérmica, el cual fue retomado entre 1981 y 1982 (Canul y Rocha, 1981).

A finales de marzo de 1982, la erupción explosiva (VEI 5) del volcán Chichonal, también conocido como El Chichón, fue definida como el peor desastre causado por actividad volcánica en tiempos recientes de México. El evento natural consistió en la destrucción de un domo y la formación de un cráter-lago. Por tal razón la CFE decidió abandonar el proyecto de interés geotérmico (Canul et al., 1983).



Fig. 1. Ubicación del complejo volcánico.

Después de la erupción se han realizado diversos estudios sobre el volcán, la mayoría de tipo científico y enfocados a la génesis y al riesgo volcánico (Carey and Sugurdsson, 1986; Capaul, 1987; Armienta *et al.*, 2000; Espíndola *et al.*, 2000; Capaccioni *et al.*, 2004; García-Palomo *et al.*, 2004).

En marzo de 2007 la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) organizó una serie de conferencias para conmemorar los 25 años de la erupción. Poco después la GPG le solicitó a la UNAM un estudio de prospección geotérmica, mientras llevaba a cabo otros estudios con su propio personal, cuyos resultados principales se presentan en este trabajo.

El proyecto geotérmico del Volcán Chichonal se localiza en el estado de Chiapas, aproximadamente 68 km en línea recta al NNW de Tuxtla Gutiérrez y 20 km al SW de la ciudad de Pichucalco (Fig. 1).

## 2. Geología y morfología

Desde el punto de vista regional el proyecto geotérmico del Chichonal se ubica en una zona sujeta a diferentes procesos geológicos: sedimentación, subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica, plegamientos, fallamientos normales, laterales e inversos y actividad volcánica en épocas recientes. Los elementos tectónicos regionales lo integran las placas de Norteamérica, del Caribe y la de Cocos con su zona de subducción, y con más detalle la Plataforma de Yucatán, el Cinturón Plegado (Anticlinorio de Chiapas), la Falla del Istmo, el Macizo Granítico y el sistema de fallas Motagua-Polochic. Otro rasgo importante que se puede observar perfectamente, es la zona constituida por bloques que tectónicamente forman la provincia conocida como de Fallas de Transcurrencia (Carfantan, 1981).

El complejo volcánico del Chichonal se encuentra situado en el Anticlinorio de Chiapas, que en conjunto tiene vergencia hacia el norte, siendo sepultado por sedimentos post-miocénicos que alcanzan espesores considerables en la Planicie Costera del Golfo.

Las estructuras geológicas de origen primario en la zona del complejo volcánico son resultado de procesos de sedimentación que dieron lugar a estratos terrígenos y calcáreos con estratificación de diferentes unidades en el tiempo y en el espacio con cuerpos tabulados. Las estructuras de origen secundario son las que se forman posteriormente a los procesos de la diagénesis como respuesta a cambios de esfuerzo y de temperatura. Fue posible identificar en campo estos cambios como procesos de deformación: traslación, rotación y dilatación, buzamiento de estratos que infieren flancos de anticlinales o sinclinales, fracturamiento, fallamiento lateral, normal e inverso que dan lugar a cabalgamientos. El estudio incluyó el levantamiento de estaciones estructurales.

En la zona del complejo volcánico del Chichonal hay varias estructuras de origen secundario, consistentes en anticlinales y sinclinales con ejes de dirección NW-SE y NNW-SSE, cuyos flancos varían de 42° a 65°. Al norte de Chapultenango fue posible identificar un valle producto de un sinclinal de orientación E-W, que da lugar al drenaje del Río Mova.

Uno de los plegamientos es el Anticlinal de Caimba, situado en la parte NE del volcán, con orientación NW-SE y buzamiento al NW. Las rocas calcáreas constituyen su núcleo y afloran en su cima, formando una serranía con una altura de 1140 msnm.

En la parte oeste del complejo volcánico se encuentra una sierra que corresponde al flanco suroeste de un pliegue asimétrico (recumbente) conocido como La Unión, el cual alcanza su máximo desarrollo (cabalgamiento) en la población de Xochimilco; la orientación de sus flancos así como el buzamiento de la estructura es NW-SE.

Entre los plegamientos antes mencionados y al norte del área de estudio se encuentra el sinclinal de Buena Vista que es truncado por un cabalgamiento inverso. También su porción sur es interrumpida por material volcánico. Para efectos de este estudio el sinclinal se estudió solamente en la zona del complejo volcánico, y ligado a las manifestaciones termales superficiales en sus cuatro sectores.

Desde el punto de vista morfológico, El Chichonal es un volcán compuesto con un cráter con diámetro de 1.5 x 2 km denominado Somma con una elevación máxima de 1150 msnm (Figura 2). En realidad el cráter Somma es un anillo de domos (domos anulares) que tiene paredes internas sub-verticales y pendientes externas suaves. La elevación relativa del Somma con respecto a la topografía circundante es de sólo 700 msnm con respecto a la parte este y de 900 msnm en la parte occidental. El cráter Somma está cortado por estructuras más jóvenes, en su parte SE por el cono de tobas Guayabal y al SW por un domo de lavas. El

cráter Somma alberga en su parte interior un cráter-lago creado por la destrucción de un domo en la erupción de 1982 con un diámetro de 1 km y paredes verticales de 140 m. La altura máxima del cráter sobre el nivel del mar es de 1100 m y la altura del fondo del cráter es de 860 msnm.

Existen otras estructuras asociadas al edificio principal del volcán, esencialmente domos, a los cuales se les ha denominado Domo NW, Domo SW y Domo Cambac, que a diferencia de los domos anulares del Somma se encuentran en la parte externa del edificio principal.

### 3. Estratigrafía

La estratigrafía superficial del área de estudio consiste en rocas sedimentarias del Mesozoico y Cenozoico y en rocas volcánicas del Cuaternario.

La descripción de las rocas sedimentarias que afloran en la zona del proyecto se tomó de resultados de las perforaciones de los pozos realizados por Pemex en 1981, y para las rocas de la actividad volcánica se tomaron de publicaciones y trabajos de cartografía reciente.

Para este estudio, se decidió concentrar la investigación en la secuencia sedimentaria y los depósitos volcánicos que afloran en torno al volcán.

### Secuencia Sedimentaria

#### A. Evaporitas del Cretácico Inferior y calizas del Cretácico Superior

En esta secuencia se han agrupado dos grandes paquetes sedimentarios. El primero y el más antiguo se compone de rocas evaporíticas intercaladas con calizas dolomitizadas y niveles bentoníticos (Fig. 3). La cima de las evaporitas se encuentra a 2595 m de profundidad en el pozo Caimba 12, perforado por Pemex el cual se ubica al NE de la Colonia El Volcán. Sobreyaciendo concordantemente a las evaporitas se encuentra una secuencia potente de calizas masivas dolomitizadas. Sus colores son café claro y gris, petrográficamente se clasifican como calcarenitas arrecifales. También se observan brechas y desarrollos arrecifales, lo que indica que estas rocas pertenecen a un ambiente de plataforma. Hacia su cima se observan calizas arcillosas, con nódulos de pedernal y en estratos más pequeños, pero que aún conservan características de alta energía con facies más pelágicas. Todos estos carbonatos son visibles en el anticlinal Caimba en donde se estimó un espesor de 2500 m, que corresponde a los espesores cortados por los pozos de Pemex.

#### B. Lutitas arenosas calcáreas del Paleoceno-Mioceno Inferior

Estas unidades forman un paquete de rocas donde predomina la porción terrígena que se asocia a un régimen erosivo y que permite depositar facies de tipo flysch. Toda esta unidad agrupa en su base a lutitas de color gris oscuro con niveles de calizas que poco a poco van graduando a arcillas laminares. Hacia la cima aparecen lentes o estratos de areniscas. Hacia su parte intermedia se alterna con numerosos niveles de areniscas en estratos pequeños y sobresalen niveles calcáreos en forma de lentes con desarrollos coralinos (Fig. 3). Estos son bien visibles al sur del volcán Chichonal principalmente en el Río Susnubac, donde a la altura de Agua Caliente se observan bloques enormes de estas rocas ricas en corales. También se encontraron



Fig. 2. Morfología del volcán Chichonal donde se muestra el cráter Somma y el cráter-lago de la erupción de 1982. Vista al norte.

bancos que se acuñan lateralmente con Numulites del Eoceno. Por su contenido micro-faunístico, a estas capas de lutitas arenosas calcáreas se les ha asignado una edad que va del Paleoceno al Mioceno Temprano. Es sobre estas unidades terrígenas que se encuentra alojado el volcán El Chichón, siendo también la unidad litoestratigráfica más extensa en el área de estudio. Morfológicamente ocupa todas las depresiones. Se considera que tiene un espesor aproximado de 2000 m.

Se aprecia que entre estas secuencias más terrígenas y las calcáreas del Cretácico existió un cambio en el medio sedimentario, que pasó de una plataforma marina a un ambiente deltaico asociado a depósitos tipo flysch con eventuales desarrollos arrecifales.

La mayoría de las manifestaciones termales emanan del contacto entre estas unidades terrígenas arcillosas y los productos volcánicos.

### *C. Areniscas y lutitas del Mioceno Inferior*

Los estratos terrígenos de esta unidad se convierten progresivamente en capas ricas en arenas que llegan a formar grandes bancos de areniscas y conglomerados de color café claro ricos en micas, estructuras primarias, restos de hojas, carbón y tallos. Estos bancos se alternan con lutitas limosas de color gris oscuro (Fig. 3). Los mismos bancos de areniscas son los que morfológicamente obedecen las terminaciones de los pliegues al norte del volcán. El espesor estimado es de 300 m.

## **Secuencia Volcánica**

Las rocas volcánicas del área de estudio se agrupan en siete unidades con base en su distribución, características físicas, mineralógicas, químicas, edades y relaciones estratigráficas. La estratigrafía volcánica fue sustentada con dataciones radiométricas de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizadas en la universidad de Alaska, encargadas por la UNAM.

A continuación se presenta una descripción en orden cronológico de cada una (Fig. 3).

### *Unidad Somma*

El Somma representa la estructura más antigua del complejo volcánico del Chichonal, la cual contiene al cráter-lago formado durante la erupción de 1982. El Somma está disectado en tres partes de su estructura en donde nacen las cabeceras de los ríos Platanar y Mova al este, Cambac en el norte y Agua Caliente en el sureste.

Este cráter consiste de una serie de domos amalgamados de lava andesítica circundados por abanicos de depósitos de flujo piroclástico más recientes. En general las lavas que forman los domos Somma contienen abundantes fenocristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos, inmersos en una matriz vítrea, cuya composición química es traquiandesítica. Las rocas de esta estructura son las más antiguas del complejo volcánico con una edad mediante K-Ar de  $209 \pm 19$  ka (Damon y Montesinos, 1978) y  $276 \pm 6$  ka (Duffield *et al.*, 1984).

Asociados a la estructura Somma, se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas expuestos hasta 2.5 km del cráter en el lado oeste. En general estos depósitos definen abanicos suavizados, con drenaje bastante profundo, lo que indica que se trata de materiales relativamente antiguos. En general los depósitos de flujo piroclástico son masivos, compuestos de varias unidades de flujo, con espesores de aproximadamente 50 m, parcialmente endurecidos y constituidos por bloques de traquiandesita, muy similares a las rocas de los domos del Somma, con fenocristales grandes de plagioclasas, anfíboles y piroxenos. La edad de estos flujos es de 55 ka.

### Unidad Domo SW

Se define con este nombre a una estructura dómica compuesta por lavas traquiandesíticas. Este domo tiene una elevación máxima de 990 msnm con paredes sub-verticales de 300 m de alto, pobremente disectado por el drenaje, e interrumpe el borde sureste del cráter Somma. Las rocas que componen este domo son andesitas con textura porfídica compuestas por fenocristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos inmersos en una

matriz pobre de vidrio, con un 58.19 % en peso de SiO<sub>2</sub>. La edad del Domo SW ha sido establecida en 217 ± 10 ka con evidencias de exceso de argón. Aunque esta edad es cercana a la del edificio Somma (Damon y Montesinos, 1978), el Domo SW es más joven debido a relaciones estratigráficas.

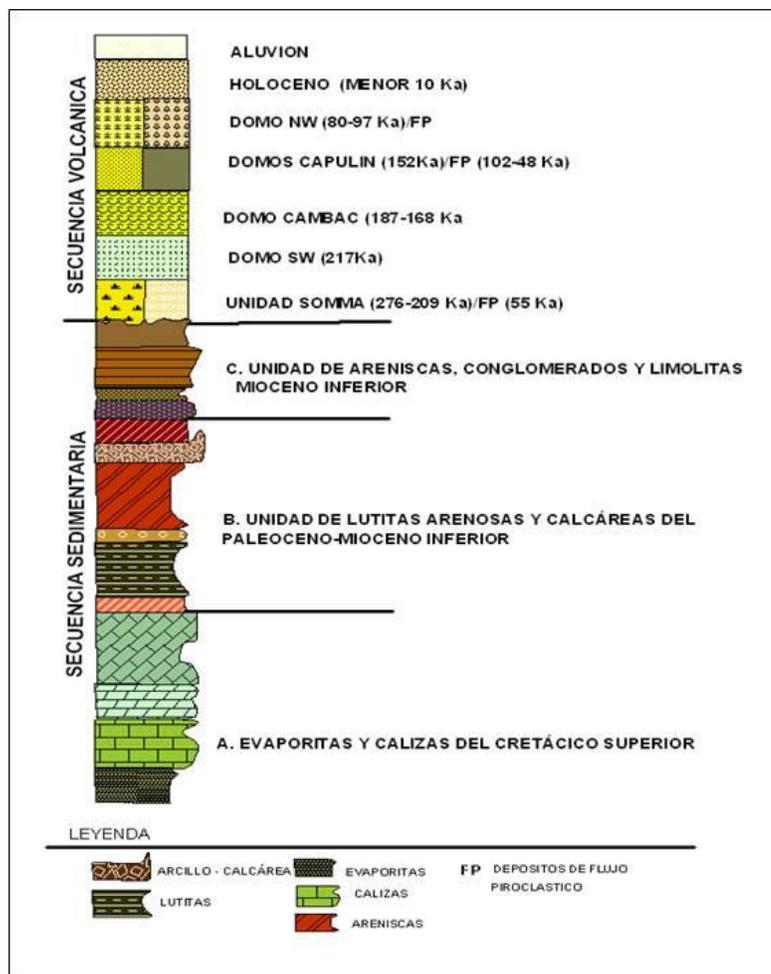


Fig. 3. Columna litológica generalizada de la zona de estudio.

al norte-noreste del volcán. Esta unidad no había sido descrita anteriormente en ningún trabajo. Está compuesta por aproximadamente seis estructuras dómicas, la más alta con una elevación de 739 msnm. En general los domos están compuestos por lava de composición traquiandesítica (57.8% en peso de SiO<sub>2</sub>) de color gris claro, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno en una matriz vítrea. Cabe destacar que en algunas partes los domos exhiben brechamiento. La edad para la unidad Capulín fue establecida en este estudio en ~152 ka mediante el método de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar.

### Unidad Domo NW

Esta unidad consiste de una estructura compleja de domos y espinas con una elevación máxima de 1048 msnm, con rasgos de erosión fuerte. Una característica sobresaliente de esta unidad es una estructura de colapso de ~700 m de ancho, abierto hacia el NW. La lava que la conforma varía de color gris a verde, parcialmente alterada, de composición traquiandesítica a basáltica (55.34-56.28% en peso de SiO<sub>2</sub>) y de textura porfídica de grano grueso con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos en una matriz pobremente vítrea. El Domo NW fue fechado en 90 ± 18 ka y 97 ± 10 ka mediante el método <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar. En el presente estudio se obtuvo otra edad de ~80 ka con el mismo método, similar a las previamente reportadas.

### Unidad Domo Cambac

Se define con este nombre a dos estructuras dómicas localizadas en la cabecera del Río Cambac. Estas estructuras tienen una forma asimétrica, aparentemente debido a que la lava que forma los domos logró fluir hacia el sector oeste. La roca de estos domos presenta un color gris oscuro con alteración de color ocre y presenta lajas de aproximadamente 10 cm. Se trata de una traquiandesita porfídica de grano medio, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxeno inmersos en una matriz vítrea, con un 56% en peso de SiO<sub>2</sub>. Además se observa un mineral de alteración de color verdoso, probablemente epidota. La edad de estas estructuras fechadas mediante el método <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar está entre ~187 y ~168 ka.

### Unidad Domo Capulín

Esta unidad está representada por varios domos de lava alineados aproximadamente en dirección este-oeste que se localizan a ~3 km

### Unidad del Holoceno

La unidad del Holoceno es la más extensa alrededor del volcán Chichonal, debido a que también comprende los depósitos expulsados durante la erupción de 1982. Durante los últimos 8 mil años se han logrado identificar 11 erupciones distintas que dejaron depósitos piroclásticos diversos (flujos piroclásticos, depósitos de caída de pómez y oleadas piroclásticas), con edades de 7300, 3700, 3100, 2500, 2000, 1900, 1600, 1500, 1250, 900 y 550 años antes del presente. Es común la presencia de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de esta unidad, así como flujos piroclásticos de pómez y flujos de ceniza. En general todos los constituyentes (pómez, bloques) tienen una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos, inmersos en una matriz fina de composición traquiandesítica (57-58% en peso SiO<sub>2</sub>). En la Figura 5 se observa la litología del complejo volcánico del Chichonal.

## 4. Geología Estructural

El objetivo de esta parte del estudio fue identificar las estructuras geológicas, principalmente las de tipo secundario que son las de mayor interés desde el punto de vista geotérmico, por lo que se estudiaron las características geométricas de las rocas deformadas y los tipos de deformación (frágil y dúctil) en el campo.

Para alcanzar el objetivo se llevó a cabo una serie de recorridos geológicos a través de los cauces de los arroyos donde la roca se encuentra al descubierto y se pueden tomar datos tales como: rumbo, buzamiento, penetrabilidad, continuidad, y datos de elementos cinemáticos como el pitch, ya sea en planos o en vetas de calcita. Este último dato permite identificar posibles reactivaciones.

La actividad de campo consistió principalmente en la medición de las fracturas y fallas con brújula Brunton. Los datos estructurales generados en campo se vaciaron en el software StereoNet para obtener sus respectivos estereogramas. El software AutoCad 2011 se utilizó para vaciar las fallas y fracturas identificadas en las estaciones estructurales a un plano escala 1:25,000.

Se ubicaron 146 Estaciones Estructurales (EE) registradas con GPS, distribuidas en la zona de interés geotérmica (Tabla 1). En ellas se levantaron 2350 datos estructurales a lo largo de los arroyos Cambac, Agua Salada, Agua Tibia, Susnubac, Agua Caliente, Magdalena y Cráter Lago (Figura 4).

Tabla 1. Resultado de los datos estructurales.

Datos estructurales	Estación estructural	Sistemas estructurales			
		N-S	NE-SW	NW-SE	E-W
	EE	537	529	651	633
TOTAL: 2350	146	22.85%	22.51%	27.70%	26.93%

### 4.1. Localidades visitadas

#### - Calizas Cretácicas de Chapultenango-Rancho San Juan

Estas afloran en la porción oriente del Volcán Chichonal sobre el Río Mova, a partir del Rancho San Juan y hasta el NW de Chapultenango. En esta última localidad se tiene el afloramiento tipo. La roca es de color gris claro en roca sana e intemperiza a un color ocre amarillento, es de estructura compacta y textura *mudstone*. Se presenta en forma estratificada con estratos que varían en espesor de 0.15 a 1 m, se observan vetillas finas de calcita menores a 1 cm de espesor sin dirección preferente. Esta secuencia sedimentaria se encuentra afectada al menos por tres etapas de deformación, que produjeron pliegues y fallas.

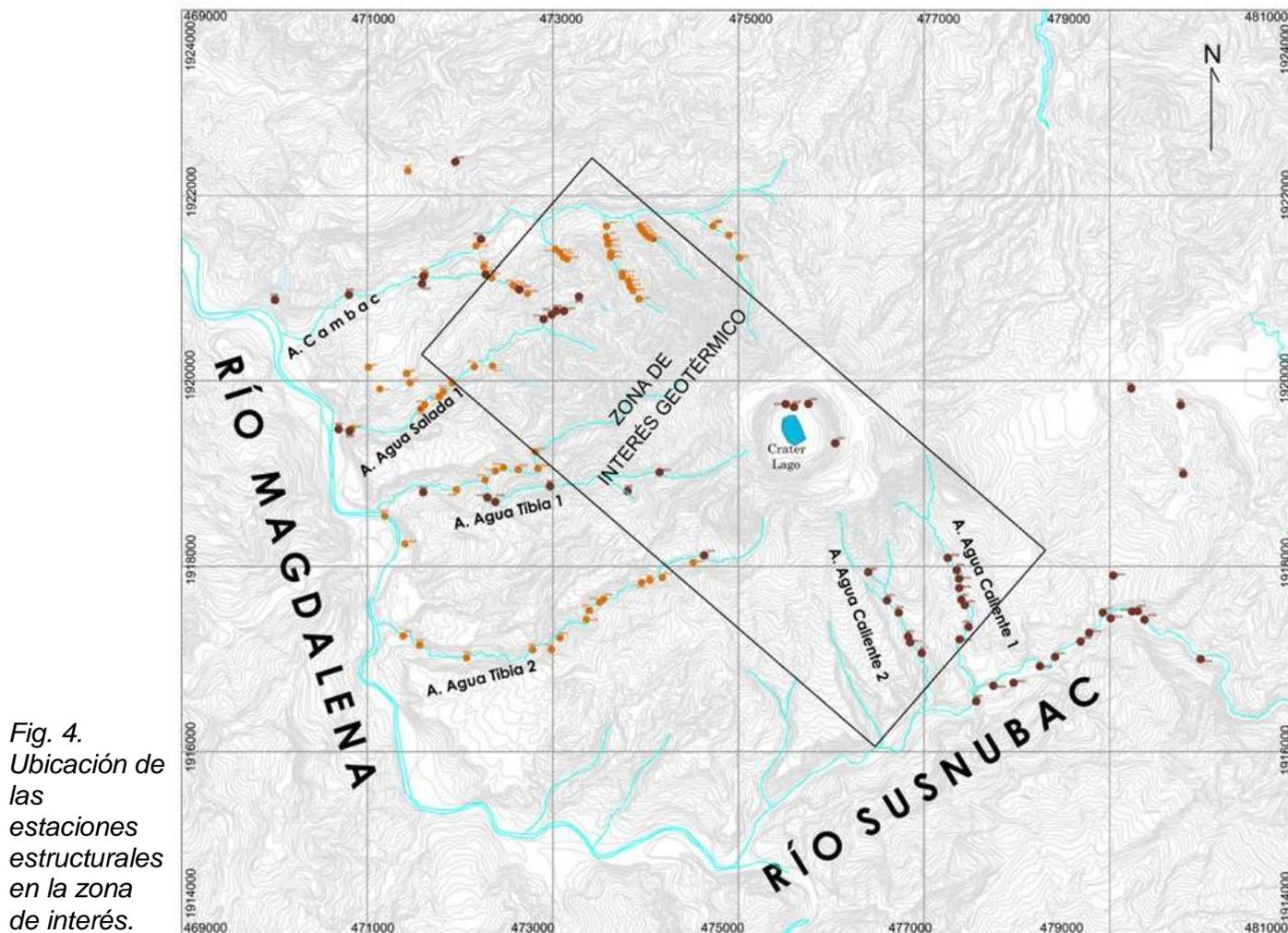


Fig. 4.  
Ubicación de las estaciones estructurales en la zona de interés.

a) Plegamiento. Este dio como resultado un sinclinal de orientación E-W, en cuyo eje tiene su cauce el Río Mova. Los flancos del sinclinal presentan la siguiente geometría: en la porción norte la estratificación es E-W con buzamiento de 45 a 60° al sur, y en su flanco sur la estratificación es E-W con buzamiento de 40 a 50° al norte.

b) Fallamiento del Sistema San Juan, de orientación E-W (N74-76°W). La traza de esta falla corre a través del Río Mova pasando por el rancho San Juan, donde toma el nombre. Se infiere que atraviesa por el aparato volcánico del Chichonal afectando a la parte norte del cráter Somma, a traquiandesitas del arroyo Agua Salada y a horizontes de arenisca del arroyo Cambac. Se considera que este sistema tiene una longitud de entre 16 a 18 km y se divide en tres segmentos, consecuencia de una deformación heterogénea.

El primer segmento de la porción este de la traza de la Falla San Juan se localiza al NW de Chapultenango sobre el cauce del Río Mova (Fig. 5). Consiste de un sistema de fallas capa-capa que se da en estratos de la misma roca. Los elementos cinemáticos permiten distinguir al menos dos tipos de movimiento: el primero de componente normal oblicua con pitch de 43 a 80° al este, el segundo componente, de carácter tectónico, se asocia con la estructura denominada Falla San Juan con desplazamiento lateral izquierdo con pitch de 10 a 25° al este. Estos elementos permiten definir que la estructura San Juan ha sido reactivada.

Este sistema está afectado por fracturas abiertas con aperturas de 2 a 15 cm y densidad promedio de 12 fracturas en un metro lineal. Uno de los fracturamientos es el conjugado, con tendencia general N-S, buzamiento de 65 a 83° tanto al este como al oeste; el segundo sistema de fracturas es el NW-SE, con buzamiento de 55 a 80° al SW.

La traza del segundo segmento se ubica en la parte central (Fig. 5). Está inferida debido a que se enmascara por los flujos piroclásticos de los diferentes eventos del volcán. Empieza a partir del Rancho San Juan cruzando la parte norte del cráter Somma hasta el arroyo Agua Salada. Esta falla se sustenta con la toma de datos en un afloramiento de lutitas intercalado con areniscas, en el cual se midieron datos conjugados de fracturas E-W.

El tercer segmento se localiza en la porción poniente del aparato volcánico (Fig. 5) y se sustenta con datos medidos en afloramientos de traquiandesitas en las manifestaciones termales del arroyo Agua Salada 1 y El Cochi, en traquiandesitas del Domo NW y estratos de areniscas en una porción del arroyo Cambac, donde se obtuvieron rumbos de fracturas de N74-76°W con buzamiento de 64-74° al SW.

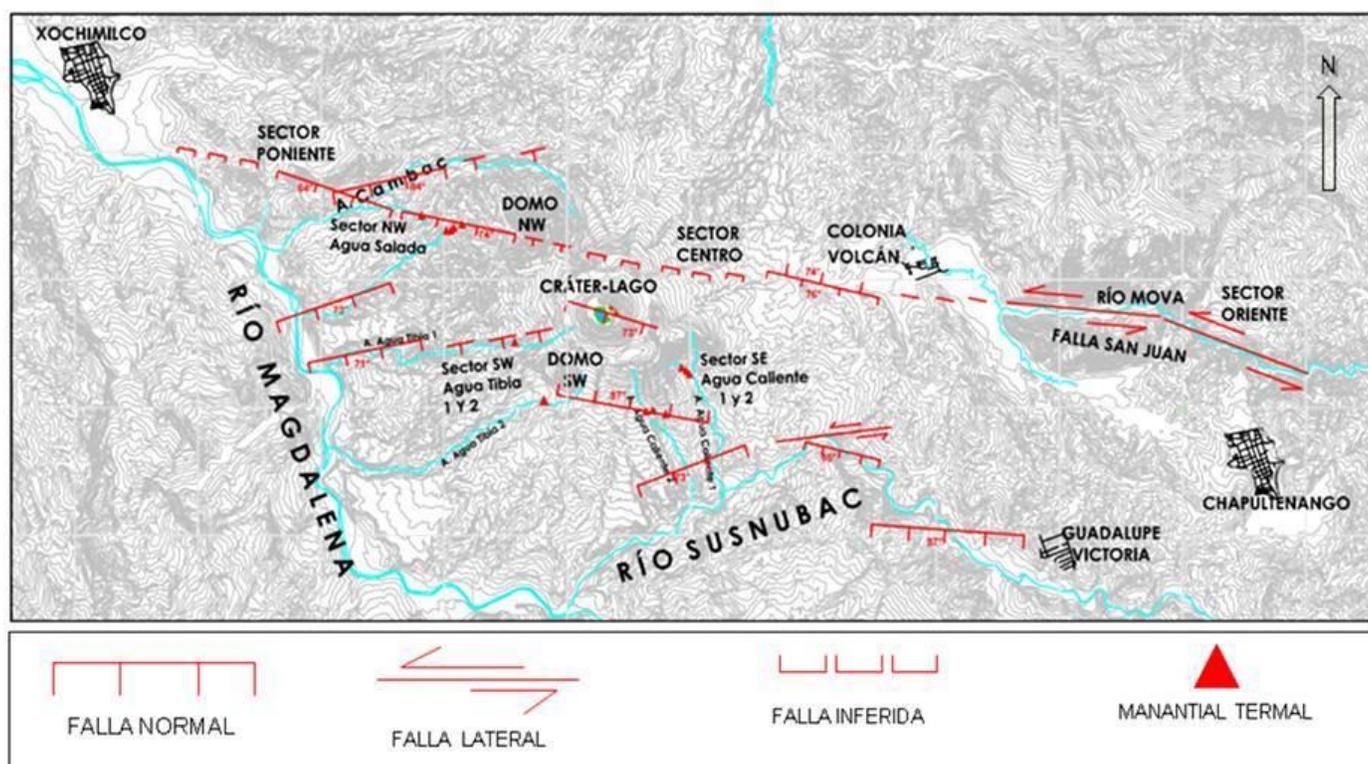


Fig. 5. Traza de la falla San Juan dividida en sus tres sectores.

- Lutitas intercaladas con areniscas del Terciario

*Localidad Guadalupe Victoria.* Al SW y W del poblado de Guadalupe Victoria y siguiendo el cauce aguas abajo del Río Susnubac (Fig. 5), se continuó con la toma de datos en afloramientos. Los datos estructurales se tomaron en lutitas intercaladas con areniscas. Los datos de estratificación de esta unidad son de orientación variable no pudiendo establecerse a qué estructura de plegamiento corresponde.

Las lutitas son de color gris claro en roca sana e intemperizan a un color ocre. Se encuentran estratificadas con espesores de 1 a 20 cm, presentan una textura escamosa y fracturas cerradas. En ocasiones estas fracturas se observan rellenas de calcita con espesores que varían de 1 a 5 cm. Estas a su vez presentan elementos

cinemáticos de fallamiento capa-capa con rumbo general de N 40°W-60° al SW y pitch de 16 a 40° al NW. La estratificación tiene un rumbo general N40-52°W con buzamientos de 33 a 60° al SW y su escarpe respectivo corresponde a la traza lineal NW-SE del Río Susnubac. Se identificaron además sistemas de fracturamiento de rumbo general N-S y resultante de N13°E-72° al SE. El sistema NE tienen una resultante de N50°E-81°NW y el fracturamiento NW-SE presenta una resultante de N40°W-80°SW. El tercer sistema es el de orientación general E-W con resultante de N85°W con 57° al sur.

*Localidad arroyo Agua Caliente (figuras 4 y 5).* Es una secuencia sedimentaria consistente en una alternancia de lutitas con areniscas. Los espesores de las areniscas varían de 10 a 50 cm y los de las lutitas son menores a 10 cm. La estratificación se midió en los estratos de arenisca, ya que al ser una roca competente conserva mayor estabilidad guardando bien definidos sus planos tanto de estratificación como de fractura. La resultante general de estratificación es de N52°E-37° al SW. Se identificó un fracturamiento abierto de 1 a 10 cm con rumbo general al NE, el cual se obtuvo una resultante de N50°E-81° al NW y fracturas secundarias del sistema N-S con buzamiento de 73° al este. Otro de los sistemas encontrados es el NW-SE con resultante de N29°W con 74° al NE y de N58°W con 69° al SW, y fracturas del sistema E-W con rumbo de N85°W con buzamiento de 87° al norte.

*Localidad arroyo Cambac.* Al NW del volcán se recorrió el arroyo Cambac aguas arriba, de SW a NE (ver figuras 4 y 5), y se identificaron afloramientos de lutitas intercaladas con areniscas. Las primeras son de color gris oscuro con estratos de 1 a 15 cm de espesor. Las areniscas son de color gris claro, grano medio a fino y en estratos que varían de 15 a 40 cm de espesor. En estos afloramientos se midió la estratificación, obteniendo una resultante general de N85°W con buzamiento de 21° al N. El fracturamiento en general es abierto de 2 a 5 cm y se agrupa en tres sistemas. El primero es de orientación general NE-SW, con una resultante de N37°E y buzamiento de 85° al SE; el segundo sistema medido tiene orientación NW-SE, determinándose una resultante de N44°W con buzamiento de 81° al SW. Estos dos sistemas de fracturas son de tipo conjugado, lo que indica una deformación que afecta a la estratificación. El tercer sistema es de orientación general N-S con resultante de N17°E y buzamiento de 29° al NW. Asociados a estos sistemas se observaron elementos cinemáticos de falla con componente lateral izquierda en los estratos de arenisca, con rumbo de N37°E, buzamiento de 85° al SE y pitch de 10° al NE.

*Localidad arroyo Agua Salada.* En esta localidad (ver figuras 4 y 5) se tomaron datos estructurales en dos litologías diferentes. La primera se identificó en la margen izquierda aguas arriba del arroyo y corresponde a lutitas de color amarillento a ocre con estratos menores a 15 cm de espesor; la estratificación tiene un rumbo general N-S y buzamiento al este. Este paquete sedimentario es afectado por fracturas semi-cerradas y de poca densidad (4 fracturas en un metro lineal). El primer sistema de fracturas es de orientación NE-SW del cual se obtuvo una resultante de N45°E y buzamiento de 62° al SE, mientras que el segundo sistema tiene orientación general E-W con resultante de N74°W y buzamiento de 73° al SW. La segunda litología se observó en margen derecha aguas arriba del arroyo Agua Salada 1 y se trata de lavas de composición traquiandesítica pertenecientes al domo NW. Estas son de color rosáceo con fenocristales grandes de plagioclasas y hornblenda. En estos afloramientos se observaron diferentes sistemas de fracturas, con densidad de 10 fracturas en un metro lineal. El primer sistema es de tipo conjugado y consiste de fracturas de orientación NE-SW con resultante de N50°E y buzamiento de 75° al SE, conjugadas con un segundo sistema de fracturas NW-SE con resultante de N36°W y buzamiento de 83° al SW. El tercer sistema medido es de orientación N-S con resultante de N15°W y buzamiento de 84° al este. El cuarto sistema está orientado E-W, dando una resultante de N75°W con buzamiento de 54° al S.

*Localidad de Agua Tibia 1 y 2.* Al SW del aparato volcánico del Chichonal se encuentran los arroyos de Agua Tibia 1 y 2 (ver figuras 4 y 5), donde afloran lutitas de color gris oscuro con intercalaciones de areniscas de color gris claro. Las lutitas tienen estratos con espesores menores a 15 cm y las areniscas estratos de 10 a 20 cm. La estratificación tiene un rumbo general N-S con buzamiento de 34° al W. Estas

rocas se observan fracturadas en dos sistemas ortogonales, el primero de los cuales es perpendicular a la estratificación, con orientación E-W, resultante de  $N79^{\circ}E$  y buzamiento de  $71^{\circ}$  al SE. El segundo sistema de fracturas es paralelo al rumbo de la estratificación, de dirección N-S, resultante de  $N06^{\circ}E$  y buzamiento de  $77^{\circ}$  al E. Todos los datos se recogieron en estratos de lutitas.

#### - Traquiandesitas del cráter-lago

Se hizo un recorrido en el interior del cráter-lago con la finalidad de encontrar una asociación sistemática de los sistemas de fracturas internas con las externas. Hay dos sistemas conjugados de fracturas de dirección NW-SE y NE-SW. El primer sistema conjugado incluye un sistema de dirección NW-SE con resultante de  $N52^{\circ}W$  y buzamiento de  $72^{\circ}$  al NE, y otro de dirección NE-SW con resultante de  $N42^{\circ}E$  y buzamiento de  $76^{\circ}$  al NW. El segundo conjugado consiste igualmente de un sistema NW-SE pero ahora con resultante de  $N58^{\circ}W$  y buzamiento de  $64^{\circ}$  al SW, con otro NE-SW con resultante de  $N38^{\circ}E$  y buzamiento de  $83^{\circ}$  al NW. Se identificó también un tercer sistema de fracturas, de orientación general N-S, donde se obtuvo una resultante de  $N19^{\circ}W$  con buzamiento de  $56^{\circ}$  al SW. En esta zona se midió un elemento cinemático con rumbo de  $N74^{\circ}W$ , buzamiento de  $73^{\circ}$  al SW y un pitch de  $77$  y  $75^{\circ}$ .

## 4.2. Sistema NW-SE, Chichón-Catedral

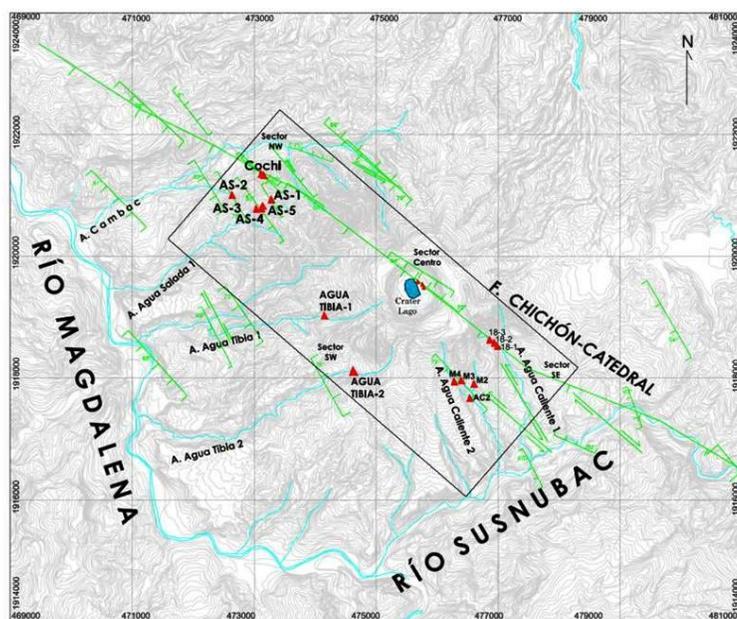


Fig. 6. Estructuras pertenecientes al sistema NW-SE Chichón-Catedral.

Se le denomina así a un sistema estructural de orientación NW-SE que se detecta a partir del Volcán Catedral, ubicado a unos 25 km al NW del volcán Chichonal. La geometría de este sistema consiste de un patrón estructural de escalonamiento izquierdo. Para el presente trabajo se identificó un fragmento de 13 km de longitud de este sistema, a partir del Río Susnubac al oeste de Guadalupe Victoria pasando por el cráter Somma y hasta el arroyo Cambac, al NW del volcán Chichonal (Fig. 6).

La integración de este segmento lo componen las resultantes de las estaciones estructurales obtenidas a partir del alineamiento NW-SE del Río Susnubac, centro del cráter-lago, Somma y en el arroyo Cambac.

Los datos estructurales que confirman este sistema son:  $N31^{\circ}W$  (resultante)/ $76^{\circ}SW$  (buzamiento),  $N31^{\circ}W/82^{\circ}SW$ ,  $N36^{\circ}W/83^{\circ}SW$ ,  $N58^{\circ}W/64^{\circ}SW$ ,  $N31^{\circ}W/80^{\circ}SW$ ,  $N43^{\circ}W/79^{\circ}SW$ ,  $N40^{\circ}W/80^{\circ}SW$ ,  $N30^{\circ}W/64^{\circ}SW$ ,  $N44^{\circ}W/81^{\circ}SW$  y  $N32^{\circ}W/76^{\circ}NE$ ,  $N44^{\circ}W/65^{\circ}NE$ ,  $N38^{\circ}W/81^{\circ}NE$ ,  $N52^{\circ}W/72^{\circ}NE$ . Estos datos constituyen sistemáticamente un sistema conjugado en el cual se infiere que la componente sintética buza al SW. Se considera que las estructuras de este sistema son conductoras de los fluidos geotérmicos y que la falla Chichón-Catedral puede ser una frontera para esos fluidos.

## 4.3. Sistema Estructural NE-SW

En la zona del Chichonal existe un sistema de fracturas de orientación preferencial NE-SW, que de acuerdo a los análisis realizados en estudios anteriores podría determinar el límite este-oeste de la zona termal, definido al sureste por el cauce del Río Susnubac y al noroeste por el del arroyo Cambac (Fig. 7). Para este trabajo

describiremos el comportamiento y distribución de las fracturas registradas en las estaciones estructurales ubicadas dentro de la zona de interés geotérmico.

Dentro de esa zona, el sistema NE-SW se observa de manera más evidente hacia el NW, en la zona de los manantiales de Agua Salada y El Cochi, ya que en los demás tributarios de los arroyos los registros son menores, incrementándose hacia el cauce del Río Susnubac, fuera de la zona de interés.

Para la zona de los manantiales de Agua Salada y El Cochi se midieron las siguientes estaciones estructurales:

- EE10, con resultante de  $N58^{\circ}E$  y buzamiento de  $58^{\circ}SE$ ; este fracturamiento se midió en estratos de lutitas color gris oscuro.
- EE11, con resultante de  $N56^{\circ}E$  y buzamiento de  $84^{\circ}SE$ ; los datos de esta estación se midieron en una plancha de arenisca color gris oscuro de grano fino de textura sacaroide, que presenta derrumbes debido al intenso fracturamiento.
- EE15, con resultante de  $N58^{\circ}E$  y buzamiento de  $78^{\circ}SE$ ; estas fracturas se observan abiertas con densidad de 7 fracturas en un metro lineal, pero algunas se encuentran rellenas por material arcilloso. Donde se midió esta fractura se observó impregnada con sílice.
- EE20, con resultante de  $N50^{\circ}E$  y buzamiento de  $76^{\circ}SE$ ; los datos de esta estación se tomaron en un afloramiento inestable de traquiandesitas.
- EE27, con resultante de  $N65^{\circ}E$  y buzamiento de  $47^{\circ}SE$ ; estos datos se tomaron justo donde emana el manantial El Cochi, en rocas traquiandesitas porfídicas. Se observaron 7 fracturas en un metro lineal.
- EE28, con resultante de  $N59^{\circ}E$  y buzamiento de  $86^{\circ}NW$ , con pitch de  $60^{\circ}$  y  $66^{\circ}$  al oeste. Se observa como zona de derrumbe.
- EE33, con resultante de  $N52^{\circ}E$  y buzamiento de  $73^{\circ}SE$ ; estas fracturas se midieron en estratos de areniscas con textura sacaroide de grano fino, que también son cortadas por el sistema E-W muy cerca del manantial Agua Nueva.
- EE45, con resultante de  $N38^{\circ}E$  y buzamiento de  $83^{\circ}NW$ ; datos medidos en afloramiento de traquiandesitas en los manantiales de Agua Salada.
- EE46, con resultante de  $N38^{\circ}W$  y buzamiento de  $82^{\circ}SE$ ; los datos se midieron en traquiandesitas en el Arroyo Agua Salada.

Dentro de la pared interna del Cráter-Lago se registraron las siguientes estaciones:

- EE67, con resultante de  $N42^{\circ}E$  y buzamiento de  $83^{\circ}NW$ ; fracturas medidas en traquiandesitas con apertura de 2 a 8 cm.
- EE70, con resultante de  $N62^{\circ}E$  y buzamiento de  $76^{\circ}NW$ ; es un plano con superficies pulidas en rocas traquiandesíticas.
- EE61, con resultante de  $N45^{\circ}E$  y buzamiento de  $81^{\circ}NW$ ; datos medidos en lutitas finamente estratificadas de 5 a 20 cm.

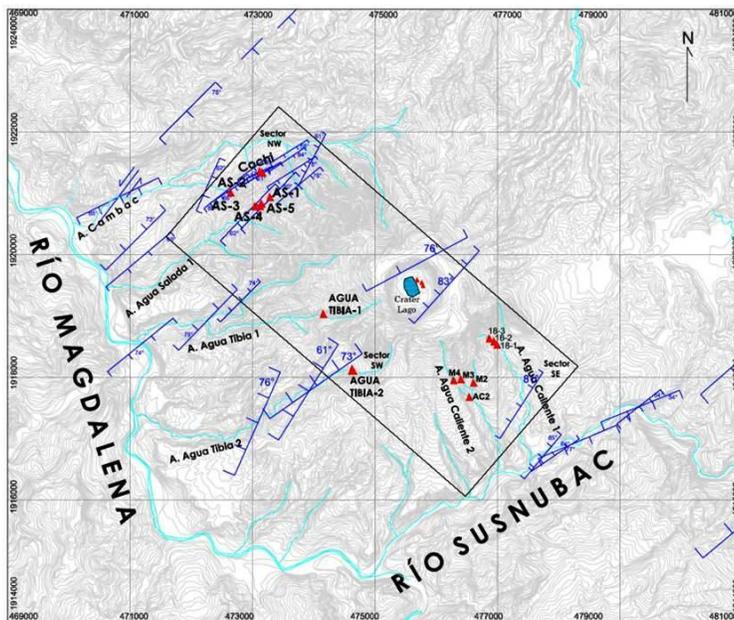


Fig. 7. Geometría del sistema estructural NE-SW.

- EE43, con resultante de  $N55^{\circ}E$  y buzamiento de  $73^{\circ}NW$ ; afloramiento de lutitas donde convergen varios sistemas de fracturas sobre el Arroyo de Agua Tibia 1. El afloramiento se observa inestable y las fracturas están abiertas de 1 cm a 4 cm.
- EE44, con resultante de  $N32^{\circ}E$ , buzamiento de  $61^{\circ}NW$  y pitch de  $70^{\circ}$  y  $71^{\circ}$  al NE con reactivación lateral; el escalonamiento se inclina al W. Afloramiento de lutitas sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia 1.

En resumen, para la zona de interés geotérmico en su conjunto se obtuvo una resultante general de  $N54^{\circ}E/71^{\circ}SE$  en la zona NW, donde se localizan los manantiales de Agua Salada y El Cochi, y de  $N46^{\circ}E/78^{\circ}NW$  para la zona centro y sureste, resultando un fracturamiento NE-SW con buzamiento al SE y NW de tipo conjugado.

#### 4.4. Sistema Estructural N-S

Este es otro de los sistemas importantes medidos en los diferentes afloramientos tanto de rocas sedimentarias como de rocas volcánicas, dentro de la zona de interés geotérmico. A continuación se describen las estaciones estructurales donde se identificó.

En la zona de los manantiales termales de Agua Salada y El Cochi (Fig. 8) se registraron las estaciones siguientes:

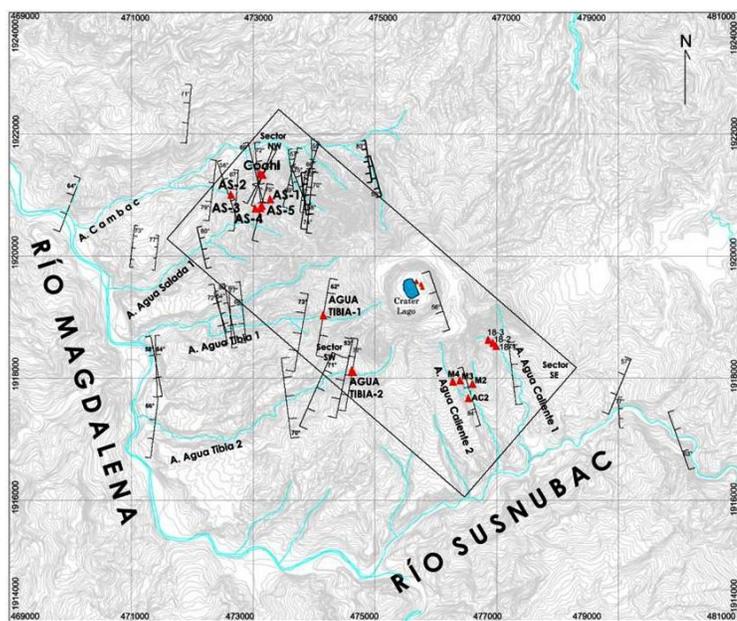


Fig. 8. Geometría del sistema estructural N-S.

- EE14, con resultante de  $N14^{\circ}E/57^{\circ}SE$ ; fracturas medidas en traquiandesitas en afloramiento inestable. Las fracturas se observan abiertas sin mucha penetración, y son cortadas por el sistema E-W.
- EE15, con resultante de  $N07^{\circ}W/69^{\circ}NE$ ; fracturas en traquiandesitas al NW del aparato volcánico. Se observan abiertas con densidad de cinco fracturas en un metro lineal.
- EE21, con resultante general de  $N08^{\circ}E/72^{\circ}SE$ ; datos medidos en un plano de traquiandesitas con superficies pulidas, observándose milonitización en los planos.
- EE22, con resultante general de  $N07^{\circ}W/74^{\circ}NE$ ; datos tomados en una plancha de traquiandesitas de 5 m x 10 m con superficies pulidas.
- EE23, con resultante general de  $N08^{\circ}E/68^{\circ}SE$ ; plano de falla con pitch de  $40^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  y  $47^{\circ}$  con dirección al SW.
- EE15, con resultante de  $N14^{\circ}W/69^{\circ}SW$  con pitch de  $56^{\circ}$ ,  $44^{\circ}$  y  $34^{\circ}$  con dirección al SE.
- EE19, con resultante de  $N22^{\circ}W/75^{\circ}NE$ ; fracturas abiertas de 2 cm a 7 cm con clorita impregnada sobre la pared de las fracturas.
- EE25, con resultante general de  $N14^{\circ}W/69^{\circ}SW$ ; plano de falla en areniscas con pitch de  $56^{\circ}$ ,  $44^{\circ}$  y  $34^{\circ}$  al SE.
- EE26, con resultante de  $N06^{\circ}W/72^{\circ}NE$  en afloramiento de traquiandesitas de textura porfídica cerca del manantial El Cochi.
- EE28, con resultante de  $N21^{\circ}E/72^{\circ}SE$  y  $N29^{\circ}E/67^{\circ}NW$ ; fractura conjugada en traquiandesitas con fracturas abiertas de 2 cm a 10 cm y densidad de 7 fracturas en un metro lineal.
- EE31, con resultante general de  $N19^{\circ}W/58^{\circ}E$ ; fractura abierta de 1 cm a 4 cm y densidad de 6 fracturas en un metro lineal.

- EE41, con resultante de  $N12^{\circ}E/53^{\circ}NW$ ; fracturas medidas en lutitas sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia.
- EE43, con resultante de  $N24^{\circ}E/71^{\circ}SE$ ; fracturas abiertas en lutitas color gris oscuro sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia.

Sobre el cauce del Arroyo Agua Caliente (Fig. 8) se midieron las estaciones estructurales EE74 y EE6, obteniendo una resultante general de  $N09^{\circ}W/80^{\circ}NE$  y  $N29^{\circ}W/74^{\circ}NE$ . Son fracturas conjugadas paralelas al cauce del arroyo. Dentro de la pared del cráter-lago se registró la estación estructural EE67 dando una resultante de  $N06^{\circ}W/82^{\circ}SW$  y observando fracturas abiertas de 1 cm a 5 cm en traquiandesitas.

En general el sistema estructural N-S no se observa con una tendencia bien definida, sino que tiene formas conjugadas. Aunque es un fracturamiento secundario que en su mayoría es cortado por alguno de los otros sistemas antes descritos y presenta poca penetración, es de resaltar su alta densidad en los afloramientos.

#### 4.5. Isletas de fracturamiento

Al sobreponer los tres principales sistemas estructurales descritos en la zona de interés geotérmico se definieron ciertas zonas con mayor convergencia e intensidad de fracturamiento que, desde el punto de vista geotérmico, serían las de mayor interés al presentar una mayor probabilidad de permeabilidad. A estas zonas se les denominó en este trabajo como 'isletas de fracturamiento', presentándose en la Figura 9 su ubicación.

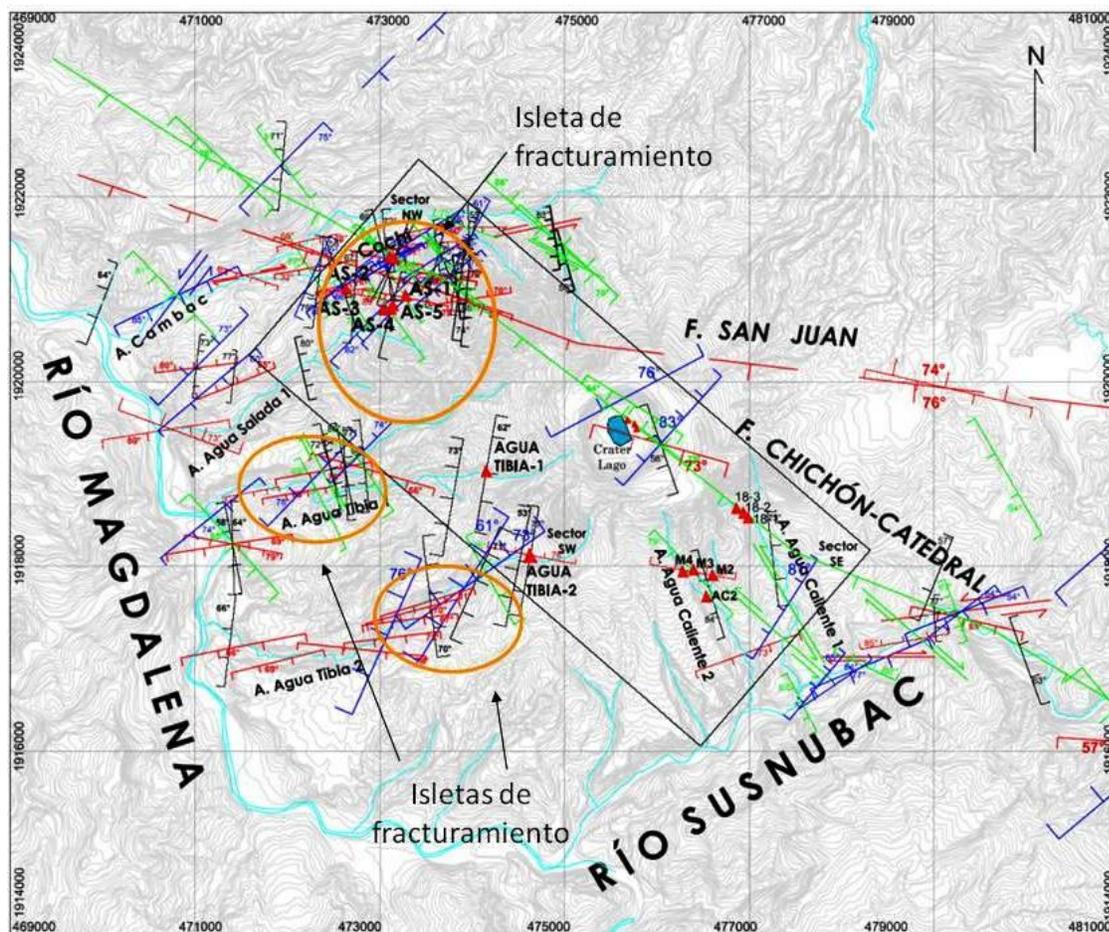


Fig. 9.  
Superposición de los sistemas estructurales e isletas de fracturamiento.

Puede verse que dos de esas isletas quedarían fuera de la zona de interés geotérmico, pero que la más septentrional parece definir un objetivo de exploración futuro, al contener los manantiales termales de Agua Salada y El Cochi, así como la intersección inferida entre las fallas San Juan y Chichón-Catedral, ambas de extensión regional.

## 5. Termalismo

Uno de los objetivos del trabajo fue actualizar la ubicación de las manifestaciones termales y asociarlas con la litología de donde emanan, identificando el tipo de manifestación, las estructuras asociadas que controlan las manifestaciones y las zonas de alteración hidrotermal (Tabla 2). Así, se censaron y muestrearon las manantiales termales de los alrededores del complejo volcánico, se ubicaron con GPS, se tomó su temperatura, pH y litología en la cual emanan, y se ubicaron en un plano a escala 1:25 000.

Tabla 2. Manantiales termales del complejo volcánico censados y muestreados.

Manantial	Litología	T(°C)	pH	Observaciones
Manantial-2 (M2)	Contacto entre lutitas y piroclastos.	65	7	La muestra de agua se tomó en un tributario del Arroyo Agua Caliente 2.
Manantial-3 (M3)	Contacto entre lutitas y piroclastos.	58	7.5	Manantial en el Arroyo de Agua Caliente 1.
Muestra-4 (M4)	Contacto entre lutitas y piroclastos.	29	-	La muestra se tomó en el afluente del Arroyo de Agua Caliente 1.
Manantial AS1	Contacto entre traquiandesita y piroclastos.	44	5	La muestra se tomó en un manantial en la parte de arriba del arroyo Agua salada 1.
Manantial AS2	Contacto entre lutitas y piroclastos.	64	7.5	Manantial en la parte alta del Arroyo Agua Salada 2.
Manantial AS3	Material piroclástico de pómez.	50	7	Se tomó en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AS4	Contacto entre traquiandesita y piroclastos.	60	2.5	La muestra de agua se tomó en la margen derecha aguas arriba del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AS5	Material piroclástico de pómez.	72	7	Manantial en la margen derecha del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AT1	Contacto entre arenisca arenosa y material piroclástico.	70	7.5	Manantial en la parte alta del Arroyo Agua Tibia 1.
Manantial AT2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez.	50	7	La muestra de agua se tomó en la unión de dos manantiales del Arroyo Agua Tibia 2.
Manantial AR	Material piroclástico de pómez.	26	3.5	Manantial en la margen derecha del Arroyo Agua Caliente 1.
Manantial 18-1	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez.	60	8.5	Manantial en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Caliente 1.
Manantial 18-2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez.	64	6.5	Muestra tomada en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Caliente.
Cauce 18-3	Cauce del Arroyo Agua Caliente.	70	8.5	Muestra de agua tomada en la cascada en la parte alta del Arroyo Agua Caliente.
LGOCTER	Dentro del lago-cráter.	22	2	Muestra tomada al este del lago-cráter del volcán.
Manantial Agua Caliente 2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez.	40	8	Manantial en la parte alta de un tributario del Arroyo Agua Caliente 2.
El Cochi	En fractura de traquiandesitas.	60		El manantial emana de una fractura de traquiandesitas del Domo NW.

Las manifestaciones termales identificadas consisten principalmente de manantiales de agua caliente y fumarolas. De acuerdo con su ubicación, pueden agruparse en cuatro sectores tomando como referencia el centro del volcán Chichonal: sector sureste, sector suroeste, sector noroeste y sector centro.

a) Sector sureste. Los manantiales termales dan lugar al denominado arroyo Agua Caliente 1. Emanan a partir de la cota 620 a 700 msnm, con temperaturas de 60 a 70 °C y un pH de 6.5 a 8.5. Su centro de emanación corresponde al contacto entre las lutitas y los depósitos piroclásticos. Otra localidad más al SSE del volcán es el arroyo Agua Caliente 2, alimentado también por manantiales calientes que se ubican en la cota 640 a 700 msnm. Las temperaturas varían de 44 a 65°C, pH de 5 a 7 y su centro de emanación es el contacto litológico entre lutitas y material piroclástico.

b) Sector suroeste. Hacia el SW del aparato volcánico del Chichonal brotan los manantiales denominados arroyo Agua Tibia 1 y 2. Se ubican entre las cotas 620 a 660 msnm. Las temperaturas medidas son de 50 a 70°C, con un pH de 7 a 7.5. Estos manantiales emanan del contacto entre lutitas intercaladas con areniscas y depósitos piroclásticos.

d) Sector centro. El termalismo en este sector se localiza dentro de la estructura del cráter-lago formado en la erupción de 1982. Las manifestaciones termales se ubican entre las cotas 890-900 msnm y consisten de hervideros, fumarolas (*soap pools*) y suelos calientes. Se caracterizan por presentar temperaturas que varían de 58 a 96 °C y pH de 4 a 8. Las fracturas abiertas de forma irregular dan lugar a la presencia de fumarolas (Foto 1) donde es posible identificar la precipitación de azufre nativo y hedor tenue de H<sub>2</sub>S. La distribución del termalismo en este sector presenta un alineamiento general NW-SE (Sistema Chichón-Catedral) e inflexión al E-W (Sistema San Juan).



Foto 1. Cráter-lago en la cima del volcán visto al suroeste, mostrándose las manifestaciones termales.

d) Sector noroeste: Estos manantiales se ubican a 3.5 km al NW del volcán, pudiendo agruparse en las zonas de Agua Salada 1 y Agua Salada 2. Los de Agua Salada 1 emanan en ambos márgenes del arroyo con un alineamiento NE-SW, desde la cota 530 a 600 msnm. En la margen derecha aguas arriba del arroyo existen dos manantiales que emanan de los derrames de lava de composición traquiandesítica, producto del Domo NW, en contacto con material piroclástico. En la margen izquierda aguas arriba del arroyo se ubican dos

manantiales termales que emanan del material piroclástico, compuesto principalmente de pómez. Las temperaturas de los manantiales varían de 50 a 60°C con pH de 2.5 a 7.5. Por su parte, los manantiales del arroyo Agua Salada 2 se ubican 450 m al NW del arroyo Agua Salada 1 y presentan un alineamiento E-W. Hay un manantial termal que brota en la cota 460 msnm en el contacto entre lutitas y depósitos piroclásticos, con temperatura de 64°C y pH de 7. Estos manantiales se diferencian de los anteriores por su sabor salobre, su baja cota y por su posición, no directamente asociada con el volcán, sino más bien con el Domo NW.

De acuerdo a las observaciones de campo y análisis de la información se considera que el termalismo activo en el complejo volcánico del Chichonal está limitado por fronteras de orientación NE-SW y NW-SE.

## 6. Conclusiones y recomendaciones

- El Chichonal es un volcán activo en cuya cima hay un cráter de 1.5 por 2 km de diámetro, denominado Somma y producto de la intensa erupción de 1982, dentro del cual hay actualmente un lago.
- El posible yacimiento geotérmico asociado al volcán es un sistema magmático-hidrotermal activo.
- Localmente el volcán está emplazado en un basamento de rocas sedimentarias que incluyen evaporitas del Jurásico, calizas del Cretácico y areniscas y lutitas del Terciario.
- Desde el punto de vista tectónico, el complejo volcánico del Chichonal está situado dentro de la Provincia de Fallas Laterales Motagua-Polochic.
- Las rocas del basamento están afectadas por fallas orientadas E-W con movimiento lateral izquierdo, como la Falla San Juan, y por fallas normales de rumbo NE-SW con buzamiento al NW.
- Los estilos de deformación en la zona del complejo volcánico incluyen los tipos dúctil y frágil. La deformación dúctil ha dado lugar a pliegues (anticlinales y sinclinales) y la frágil a fracturas y fallas.
- Localmente las estructuras que afectan al complejo volcánico del Chichonal son las NW-SE (Sistema Chichón-Catedral) y las E-W (Sistema San Juan).
- Desde el punto de vista estructural se infiere que la actividad hidrotermal está controlada por estructuras de orientación NW-SE y NE-SW.
- Las manifestaciones termales en la zona del complejo volcánico del Chichonal consisten de manantiales termales, fumarolas y hervideros que se pueden agrupar en cuatro sectores: SE, SW, Central y NW. En los sectores SE y SW las manifestaciones se ubican entre los 620 y 700 msnm, en el Central entre 890 y 900 msnm, y en el NW entre 460 y 600 msnm.
- Las manifestaciones termales en el exterior del volcán emanan del contacto litológico de la secuencia de lutitas con los productos piroclásticos de origen reciente. En el sector Central están asociadas con la estructura volcánica principal y en el sector NW se consideran más relacionadas con el Domo NW.
- La evaluación geoquímica de las manifestaciones termales sugiere la existencia de un sistema geotérmico profundo con temperaturas de 230°C, calculadas por el geotermómetro Na/K, y de hasta 260°C con el geotermómetro de gases H<sub>2</sub>/Ar.
- Las características termales en el área de estudio indican la existencia de una fuente de calor de alta temperatura susceptible de aprovecharse para generar energía eléctrica.

- A partir del análisis estructural y de la evaluación geoquímica puede definirse una zona de alto interés geotérmico hacia el NW del cráter-lago.
- Se recomienda realizar estudios geofísicos de alta resolución magnética y resistiva que permitan visualizar con mayor detalle las propiedades físicas y la geometría de la litología del subsuelo, además de la posible configuración del conducto volcánico.
- También es recomendable monitorear la actividad sísmica para tratar de distinguir actividad de origen hidrotermal de la de origen tectónico.

## Referencias

- Armienta, M.A., S. De la Cruz-Reyna, and J.L. Macías, 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp. 105-125.
- Canul, R.F., A. Razo M. y V. Rocha L., 1983. Geología e historia volcanológica del volcán Chichonal, Estado de Chiapas. *Memorias de la VI Convención Geológica Nacional*, Sociedad Geológica Mexicana. México, DF., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, pp. 3-22.
- Canul, R.F., y V. Rocha L., 1981. Informe geológico de la zona geotérmica de El Chichonal, Chiapas, México. Comisión Federal de Electricidad, Informe 32-81, 38 p. Inédito.
- Capaccioni, B., Y. Tarán, F. Tassi, O. Vaselli, F. Mangani, and J.L. Macías, 2004. Source conditions and degradation processes of light hydrocarbons in volcanic gases: an example from El Chichón volcano, Chiapas, State of Mexico. *Chemical Geology*, 206, pp. 81-96.
- Capaul, W.A., 1987. Volcanoes of the Chiapas Volcanic Belt, Mexico. Tesis de Maestría, Michigan Technological University, Houghton, U.S.A. 93 p. Inédito.
- Carfantán, J.Ch., 1981. Evolución estructural del sureste de México. Paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas mesozoicas. *Revista del Instituto de Geología*, 5, pp. 207-216.
- Carey, S.N., and H. Sigurdsson, 1986. The 1982 eruptions of El Chichón volcano-Mexico (2): Observations and numerical modeling of tephra fall distribution. *Bulletin of Volcanology*, 48, pp. 127-141.
- Damon, P.E., and E. Montesinos, 1978. Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over active Benioff zone in Chiapas, Mexico. *Arizona Geol. Soc. Digest*, Vol. 11, pp. 155-168.
- Duffield, W.A., R.I. Tilling, and R. Canul, 1984. Geology of the El Chichón volcano, Chiapas, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 20, pp. 117-132.
- Espíndola, J.M., J.L. Macías, R.I. Tilling, and M.F. Sheridan, 2000. Eruptive history of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico) and its impact on human activity. *Bulletin of Volcanology*, 62, pp. 90-104.
- García-Palomo, A., J.L. Macías, and J.M. Espíndola, 2004. Strike-slip faults and K-Alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, pp. 247-268.