



Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo  
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra  
Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

---



## **“Análisis de fracturamiento y fallamiento ligado al potencial geotérmico en el volcán Tacaná, Chiapas, México”**

Para obtener el Título de:  
Maestro en Geociencias y Planificación del Territorio

Con el tema relacionado a Geología estructural en Campos Geotérmicos, presenta:  
**Geólogo Sergio Manuel Nájera Blas**

Asesor: Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy

Coasesores:

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Dr. José Luis Macías Vázquez

Dr. Antonio Pola Villaseñor



Agosto, 2017

## **Agradecimientos**

Uno gran agradecimiento para el Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy el cual me brindo de todo su apoyo para poder interesarme cada día más en el campo de las Geociencias e impulsarme para seguir preparándome en este enorme campo que es la Geología.

Al proyecto 17 de CENTRO MEXICANO DE INNOVACIÓN EN ENERGÍA GEOTERMICA que me apoyo en congresos, cursos y exposiciones, y salidas de campo que siempre nos dejan una enseñanza, y claro a mis compañeros Geólogos y Geocientíficos con los cuales compartí, aprendí y me equivoque en campo: al equipo fractal: Many y Gery, los que me acompañaron a mi zona de estudio: Adrián, Fidel, Oscar, y a todos los demás con los que compartí trabajos.

A CONACYT por la beca de maestría otorgada para la conclusión de este proyecto.

A mis compañeros de generación en especial a Gabriel, el cual me apoyo en mis distintas dudas informáticas.

A todos los profesores que me dejaron un aprendizaje: el Dr. Macías, Dr. Pola, Dr. Ángel, Dr. Pedro Corona, Dra. Aida, Dr. Olmos, Dra Erna.

Al Laboratorio de estudios Isotópicos de la UNAM campus Querétaro, en especial al Dr. Luigi Solari, por todo el apoyo brindado.

Y a mi familia y pareja por apoyarme a seguir preparándome.

# **Dedicatoria**

**A mis padres.**

“El mejor Geólogo es el que ha visto más rocas”

Read (1957)

## Contenido

### RESUMEN

### ABSTRACT

### Lista de Figuras

### Lista de Tablas

<b>Capítulo 1. GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Estado del Arte.....	3
1.3 Justificación.....	10
1.4 Objetivos generales.....	10
1.4.1 Objetivos específicos.....	10
1.5 Zona de estudio.....	11
1.6 Hidrología.....	13
1.7 Cuencas Hidrográficas.....	13
1.8 Clima y vegetación.....	15
<b>Capítulo 2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>16</b>
2.1 Trabajo de Gabinete.....	16
2.2 Trabajo de Campo.....	17
2.3 Trabajo de Laboratorio .....	19

<b>Capítulo 3. MARCO TEORICO.....</b>	<b>23</b>
3.1 Geotermia.....	23
3.2 Geología y escenarios estructurales.....	29
3.3 Mecanismos Focales.....	39
3.4 Manifestaciones Hidrotermales.....	41
<b>Capítulo 4. COTEXTO GEOLÓGICO.....</b>	<b>44</b>
4.1 Marco Tectónico.....	44
4.2 Marco Geológico.....	48
Capítulo 5. RESULTADOS.....	51
5.1 Tectónica.....	51
5.2 Geología Local.....	53
5.3 Petrografía.....	63
5.4 Geología estructural.....	68
5.5 Mecanismos Focales.....	78
5.6 Manifestaciones Hidrotermales y Permeabilidad.....	81
<b>6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>87</b>
<b>6.1 CONCLUSIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>93</b>

## **RESUMEN**

El Complejo Volcánico Tacaná (CVT) se encuentra en la intersección de tres placas tectónicas dos continentales: Norte América y Caribe en contacto por el sistema de fallas lateral izquierdo Polochic-Motagua, y que son subducidas por la placa oceánica de Cocos, el CVT se encuentra al extremo NW del Arco Volcánico Centroamericano (AVCA). Bajo este contexto, el CVT pertenece a una zona sísmicamente activa, en donde la tectónica ha afectado constantemente a las rocas del basamento por medio de fallas y fracturas que son conductos para el desplazamiento de fluidos.

En el presente trabajo se analizó la relación cinemática de las fallas por medio de mecanismos focales y estaciones estructurales, en donde los mecanismos focales de la región se grafican en perfiles a profundidad para localizar los hipocentros sísmicos, resaltando sismos someros ( $-40$  km) de tipo lateral, que afectan a las litologías presentes. Las fracturas generadas por la actividad tectónica se agruparon en rumbos preferenciales NW-SE, NE-SW, N-S y E-W. También, se realizó una descripción litológica de las rocas del basamento, donde las rocas metamórficas son fechadas en  $142 \pm 5$  Ma. Además, se definieron tres episodios de emplazamiento de granitos y granodioritas, la primera en el Eoceno medio a Oligoceno Tardío, la segunda en el Mioceno Tardío y la última en el Mioceno Temprano, también se reconocen intrusivos aplíticos del Plioceno. Sobreyaciendo de manera discordante se encuentran secuencias de calderas ( $0.8 \pm 0.016$  a  $2 \pm 0.08$  Ma.), y sobre estas estructuras se encuentran en forma discordante 4 estructuras volcánicas cuaternarias alineadas NE-SW.

Finalmente se integraron y analizaron los datos de campo para comprender las características geológico-estructurales, colocando al CVT en un ambiente estructural de intersección de fallas regionales en donde el fracturamiento y zonas óptimamente estresadas al campo de esfuerzos actual serán el conducto para el flujo de los fluidos, teniendo las mejores características en la porción NW para el aprovechamiento de un posible campo geotérmico.

**Palabras clave:** Complejo volcánico, hipocentro, Aplita, escenarios estructurales, mecanismos focales

## **ABSTRAC**

The Tacaná Volcanic Complex (CVT) is located at the intersection of three tectonic plates, two continental: North America and the Caribbean in contact by the left lateral fault system Polochic-Motagua, which are subducted by the Cocos oceanic plate. The CVT is located at the extreme NW of the Central American Volcanic Arc (AVCA). In this geology context, the CVT is contained in a seismically active zone, where the tectonic plates have affected constantly the plutonic rocks with faults and fractures that are conduits for the displacement of fluids.

In this paper, we examined the kinematic relationship of the faults with the mechanisms focus and structural stations. The focal mechanisms are plotted in the region depth profiles to locate the seismic hypocenter, highlighting shallow earthquakes ( $\sim 40$  km) of type lateral, which affect the present lithologies. Fractures generated by tectonic activity were grouped into NW-SE, NE-SW, N-S and E-W preferential courses. Also, a lithologic description of the basement rocks was realized where metamorphic rocks are dated at  $142 \pm 5$  Ma. Then, three granite and granodiorite episodes were defined; the first one in the Middle Eocene to Late Oligocene, the second one in the Late Miocene and the last one in the Early Miocene where we can find intrusive Pliocene. Overlapping in a discordant meet boiler sequences ( $0.8 \pm 0.016$  to  $2 \pm 0.08$  Ma.), and we can meet 4 aligned quaternary volcanic structures NE-SW on these structures discordant.

Finally, the field data were integrated and analyzed to understand the geological-structural characteristics, placing the CVT in a structural environment of intersection of regional faults where the fracturing and stressed zones to the current field of efforts will be the direction for the flow of the fluids, with the best characteristics in the NW portion that can be used for a possible geothermal field.

**Key words:** Volcanic complex, hypocenter, Aplita, structural scenarios.

## Lista de Figuras

- Figura 1. Direcciones preferenciales de lineamientos, para el basamento local. Tomada de De la Cruz *et al.*, (1985).....3
- Figura 2. Mapa de los ajustes tectónicos en el Cuaternario al sur de México.....6
- Figura 3. Modelo conceptual del sistema hidrotermal del volcán de Tacaná. Donde se muestra un cuerpo magmático > 4 km de profundidad (modificado de (De la Cruz *et al.*, 1989) con probable edad de 1989 A.P.).....7
- Figura 4. Ajustes cinemáticos de América Central, se muestran las principales fallas regionales con su movimiento relativo anual, tomado y modificado de Authemayou *et al.*, (2011).....8
- Figura 5. Localización del área de estudio Tacaná, Chiapas, México y principales vías de acceso desde la ciudad de Tapachula, la abreviatura CVT: Complejo volcánico Tacaná y la línea roja corresponde al aparato volcánico, la línea negra recta pertenece a la frontera entre México y Guatemala.....11
- Figura 6. Muestra los principales Río que así como su geometría, en tonalidades cafés se muestran las mayores alturas y las tonalidades azules son las alturas menores con relación al nivel del mar, la línea roja representa el aparato volcánico, la línea negra representa la frontera México Guatemala y CVT: Complejo volcánico Tacaná.....13
- Figura 7. Muestra las diferentes cuencas entre México y Guatemala, tomado y modificado de UICN/Mario Rodríguez. En donde los colores representan las diferentes cuencas, como son: amarillo: Cuenca Coatán, rosa claro: Cuenca Cahoacán, verde: Cosalapa, azul: cuenca Puerto Madero y rosa oscuro: Cuenca Unión Juárez. Los puntos rojos representan las manifestaciones termales reportadas en la zona.....14
- Figura 8. La representación gráfica y geoespacial de los elementos adquiridos se llevó a cabo con la ayuda de diferentes softwares como: a) Global Mapper 17 con la que se realizaron asignación de coordenadas, ríos y MDE b) Arc Gis 10.3 en este software se realizaron los diferentes mapas, como geológico, hidrológico, de cuencas, mapa de localización, entre



otros, c) Surfer 13 en el que se realizó un modelo conceptual en 3D y d) grafica de los datos estructurales como fallas en el software Win\_tensor 5.0.1.....17

Figura 9. Se muestra en la figura a) el levantamiento de una estación estructural, en donde se remarcan las estructuras con líneas punteadas fracturas abiertas en el poblado de la Boquilla b) afloramiento con alteración hidrotermal y oxidaciones, en donde se tomaron planos de fallas, con fracturas rellenas tomada en municipio de Pavincul, y C) líneas punteadas señalando fracturas en depósitos volcánicos adelante del poblado Coatán.....18

Figura 10. Muestra las diferentes herramientas con las que cuenta el laboratorio de laminación para realizar secciones pulidas, en donde a) muestra una muestra recolectada en campo, b) pulido de muestras en vidrio con abrasivo, c) galletas o esquirlas de diferentes litologías a analizar, d) cortadora con disco simple, e) cortadora de precisión.....20

Figura 11. Se muestran los materiales de molienda de laboratorio en donde a) microtriturador de Quijada, b) mortero de agata y c) tamices de diferentes mallados.....21

Figura 12. Muestra en a) la batea que se utilizó para realizar el searado por densidad y en b) zircones separados de la muestra, C) microscopio marca Leyca.....22

Figura 13. Mapa de anomalías del flujo de calor en  $mW/m^2$  en los límites de placas, los colores rojos señalan flujos de calor altos y los tonos azules flujos de calor bajos, medidos en  $mW/m^2$ . (Tomado de Goldstein y Hiriart, 2012).....24

Figura 14. Máquina usada en Larderello en 1904 para la generación de energía eléctrica mediante vapor caliente, con su inventor el Príncipe Piero Ginori.....26

Figura 15. Mapa en donde se muestran los límites de las Placas Tectónicas, también los principales campos geotérmicos, las zonas de volcanismo activo y zonas de Rift (tomado y modificado de Moeck, 2014).....29

Figura 17. Anderson (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley de Mohr-Coulomb, requieren que cerca de la superficie de la tierra solo se puedan formar fallas de deslizamiento según la dirección y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales e inversas).....30

Figura 18. Tipos de fracturas. A: Modo I, fracturas de tensión. B: Modo II, fracturas de cizalla. C: Modo III, fracturas de cizalla (tomado de Twiss y Moores, 1992).....	31
Figura 19. Fracturas secundarias asociadas a fallas con relación al sentido de Cizalla en este caso de tipo derecho. En dónde; R= fracturas Riedel, sintéticas con el sistema de cizalla general, R'= fracturas antitéticas a la cizalla, T= fracturas de Tensión (abiertas), paralelas al esfuerzo máximo, P= Fracturas de cizalla sintéticas con la cizalla general (Petit, 1987).....	32
Figura 20. Arreglos de las fracturas rellenas en zonas de cizalla, Tomado de Hodgson, (1989).....	33
Figura 21. Grafica en donde el eje (x) son escenarios estructurales y (y) porcentaje de 300 Sistemas Geotérmicos, con mejores escenarios para los saltos de falla ( $\approx 30\%$ ), terminaciones de falla ( $\approx 20\%$ ) y las intersecciones de falla (20%). (Tomado de Faulds, <i>et al.</i> , 2012).....	35
Figura 22. Escenarios estructurales para sistemas geotérmicos donde. A) Falla mayor de tipo normal B) Curvatura en falla Normal, C) Terminación de Falla, D) Relevos de falla, E) Intersección de Falla, F) Zona de alojamiento en fallas normales opuestas, G) Cuencas Pull-Apart. (Tomado y modificado de Faulds, <i>et al.</i> , 2015).....	37
Figura 23. Muestra el modelado de dos fallas formando una rampa de relevo a través del tiempo, Tomado de (Fossen <i>et al.</i> , 2013).....	38
Figura 24. Muestra ejemplos de los mecanismos focales: Fallas normales, fallas inversas y fallas transcurrentes.....	40
Figura 25. Diagramas hidrogeoquímicos de agua en donde: a) Diagramas ternarios de HCO <sub>3</sub> -Cl-SO <sub>4</sub> y b) Diagrama ternario de Mg-Ca-Na+K, para las muestras de Tacaná. Tomado de (Rouwet, 2006).....	42
Figura 26. Mapa tectónico donde se pueden ver los principales Sistemas de fallas al sur de México, en donde se resaltan las fallas Polochic, Motagua y el macizo de Chiapas. Tomado de (Guzmán-Speziale, 2010).....	46

Figura 27. Principales características geológicas regionales al sur de México y Guatemala, donde se muestra la ubicación del Arco Volcánico Chiapaneco, la el bloque Maya, la región de pliegues y cabalgaduras, el Macizo de Chiapas. Tomada de Garduño-Monroy <i>et al.</i> , (2015).....	47
Figura 28. Mapa geológico regional del sur de México y Guatemala con unidades desde el Precámbrico de color morado hasta el reciente. Tomado de USGS, 2015.....	49
Figura 29. Secciones Geológicas regionales en donde se muestran los contactos entre las diferentes litologías y su arreglo con respecto a las principales fallas.....	50
Figura 30. Arreglo tectónico regional al SE de México, con líneas rojas las lineaciones de fracturas y anaranjadas las fallas regionales. Así también, en color amarillo se delimita un bloque interpretado su movimiento con líneas azules y negras. Y por último, el AVCA con alineamiento de volcanes con dirección NW-SE. Las rosetas de tendencia son generadas con los rumbos de las estructuras, agrupandolas en poligonos para su mejor interpretación.....	52
Figura 31. Mapa Geológico-estructural modificado de García Palomo, 2006 y Macías, 2010.....	54
Figura 32. Columna estratigrafía del área de estudio.....	55
Figura 33. Secciones Geológicas en donde con dirección NW-SE en donde se muestra la disposición de las diferentes litologías y las fallas normales.....	55
Figura 34. Muestra afloramientos de las rocas metamórficas al norte del poblado de Chespal Viejo en donde: A) muestra roca de fuertemente fracturada color verde y alteraciones de oxidaciones, piritas, azurita y malaquita, B) muestra afloramiento de Gneises de color verde fracturamiento medio y fracturas oxidadas de color rojo oscuro, y C) rocas gneises de color verde con minerales alineados, alteración de las plagioclasas a epidotas y silicificación. ....	57

Figura 35. Afloramiento de granitos cerca del poblado de Sibinal, Guatemala. Los afloramientos se encuentran fuertemente fracturados, y fallados. Las rocas en muestra de mano se encuentran poco alteradas, tonalidades blancas y rosas, cristales de cuarzos, la mineralogía principal es de Feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, con minerales de alteración epidota y piritas diseminadas.....58

Figura 36. Afloramiento cerca del poblado de Chespal Viejo al NW del Volcán, en donde el afloramiento es de color claro, cuenta con fracturamiento intenso y fallas marcadas con marcadores cinemáticos (estrías) figura B) con alteración de óxidos de tonalidades anaranjadas a amarillo claro.....59

Figura 37. Afloramiento adelante del poblado de Chespal, con rumbo a Agua Caliente. Se pueden observar afloramiento masivo de rocas Granito-Granodiorita siendo cortada por un dique Diorítico. Las fracturas se encuentran desplazadas con el fracturamiento medio y se presentan algunos marcadores cinemáticos como estrías.....60

Figura 38. Rocas de a lo largo del río Suchiate al E del CVT, en donde se pueden apreciar en a) afloramiento de roca verde con fracturamiento medio, con fracturas rellenas, y con dique verde composición diorítica desplazado por falla Normal, en b) se pueden apreciar fracturas rellenas por cuarzo, las cuales se pueden observar con oxidaciones de color anaranjado claro y en c) Río Suchiate abajo del poblado de Unión Juárez, vista hacia el Norte, con rocas de color verde poco fracturadas afloramientos con rocas de color verde poco fracturadas....61

Figura 39. Muestras de mano de las rocas pertenecientes a los afloramiento de río Suchiate en donde: A) se muestra Roca con Textura porfídica de color verde con minerales de Cuarzo, Plagioclasa, Horblenda, B) roca de color verde con textura Fanerítica, con mayor contenido en Horblendas, y C) la tonalidad de esta muestra es clara con textura porfídica, y mayor contenido en Cuarzo, feldespato potásico y Plagioclasa.....62

Figura 40. Muestras de mano de a) intrusivo hipabisal aplita con textura porfídica y b) Intrusivo diorítico de color verde afanítico.....62

Figura 41. Muestra de roca metamórfica, en lamina delgada y muestra de mano: a) muestra lamina delgada en nicoles paralelos, se puede apreciar foliación en la roca con minerales de color café en la matriz, fracturas rellenas de color blanco y algunos minerales metálicos, b) lamina delgada en nicoles paralelos, se pueden apreciar minerales de opacos, epidotas, y estructura foliada y c) muestra de mano de color gris claro con alteración en anaranjado claro a amarillo.....63

Figura 42. Muestra lamina delgadas de granito Sibinal en nicoles paralelos donde se observa la textura grano-grano, en a) Biotita con bordes alterados, feldespato potásico con algunos, cuarzo, epidota con fracturas rellenas b) Cuarzos y feldespatos potásicos en contacto y c) muestra de mano de granito.....64

Figura 43. Laminas Delgadas de la parte NW del CVT, la mayor composición es de Plagioclasa, cuarzo y Horblendas, algunas texturas que se pueden ver es holocritalina, con minerales equigranulares las rocas se clasificaron como Granodeoritas en lámina delgada...65

Figura 44. Laminas delgadas de las muestras recolectadas en el Río Suchiate.....66

Figura 45. Laminas delgadas de muestras una textura porfídica con mesostasis de cuarzo microcristalino con plagioclasas, en a) se pueden observar en mayor cantidad mesostasis con fenocristales de cuarzo y algunos minerales opacos, posiblemente pirita, y b) fenocristales de plagioclasas con textura tipo albita con biotitas subhedral a anhedral con incrustación de minerales opacos.....67

Figura 46. Etapas de emplazamiento de granitos en donde el eje de las “X” son los eventos de mayor a menor edad, y el eje de las “Y” son millones de años calculados para cada muestra con el método radiométrico de U-Pb en zircones.....68

Figura 47. Muestra afloramientos sobre el Río Suchiate. Donde a) Cause del Río en la Frontera con Guatemala y b) afloramiento de Roca granodeorita cortado por dique diorítico que presenta fracturas medias y falla que corta al dique.....69

Figura 48. Afloramiento localizado al Sur del CVT y al norte del poblado Cacaohatan, Roca verde de composición Granodeorita, que tiene vetillas rellenas, contadas por fallas normales.....69

Figura 49. Mapa estructural muestra las principales fallas y fracturas regionales, se pueden ver los estereogramas con las fallas medidas en campo y los esfuerzos pertenecientes a las mismas.....	70
Figura 50. Depósitos Volcánicos de flujo fallados SW cerca del poblado La Boquilla en contacto con granitos.....	69
Figura 51. Afloramiento al NW del Volcán donde se aprecia el fracturamiento intenso, de aproximadamente 15m de altura con rocas metamórficas (gneis, esquisto) oxidaciones de color naranja.....	72
Figura 52. Muestra afloramiento de roca porfídica granítica cerca del poblado de Sibinal, Guatemala. Las líneas rojas muestran el fracturamiento en el afloramiento. ....	73
Figura 53. Representación gráfica de los datos en campo de las fallas en las rocas hipabisales, en donde: a) rumbo preferencial E-W de fallas normales con componente derecha, y un $\sigma_{min}$ NE-SW y en b) datos de fallas normales con componente derecha, con $\sigma_{min}$ de NW-SE....	74
Figura 54. Afloramientos de roca hipabisal, en donde a) afloramiento con rocas ácidas con alteración intensa, de color rojo a anaranjado, en donde se pueden observar el intenso fracturamiento de la roca, y b) evidencia de la cinemática de la zona, con fracturas abiertas sin relleno.....	75
Figura 55. Mapa estructural de la zona, donde se muestran en color negro las principales fallas de tipo normal, los puntos rojos representan las estaciones estructurales, y en los laterales se muestran los estereogramas del fracturamiento medido en campo.....	76
Figura 56. Mapa de distribución de dataciones radiométricas con distintos métodos, con puntos de color amarillo, se muestra la distribución de las dataciones en la bibliografía consultada, y los puntos rojos son las dataciones realizadas con el método U-Pb en zircones, realizada en el laboratorio de Isotopía del CeGeo, Querétaro.....	77
Figura 57. Mapa al sur de México y parte de Guatemala, en donde se muestran mecanismos focales con datos recolectados del Global CMT Project, las circunferencias de color negro pertenecen a los mecanismos de fallas normales, las circunferencias de color rojo corresponden a los mecanismo de fallas inversas y por último las circunferencias de color azul muestran los mecanismos de fallas de tipo lateral (Izquierdo, derecho u oblicuo). ....	78

Figura 58. Muestra los mecanismos focales de color negro los mecanismos de fallas normales y de color azul los mecanismos laterales (figura 58 a), se generan dos secciones a profundidad, en donde el rectángulo rojo se muestra el volcán de Tacaná, los dos primeros perfiles b) (A, A') son en la dirección SW-NE y el segundo (B-B') para la dirección NW-SE.....	80
Figura 59. Localización de las manifestaciones hidrotermales. Modificado de Taran (2014) y Rouwet (2006).....	81
Figura 60. Manifestaciones hidrotermales en el poblado de Agua Caliente en donde a) afloramiento en donde se encuentra a la base de la cascada la manifestación hidrotermal b) minerales de alteración con oxidaciones y c) depósito de agua con minerales de sílice.....	82
Figura 61. Mapa Geológico que muestra la localización de las muestras analizadas por microtomografía para realizar imágenes 3D.....	84
Figura 62. Localización de las muestras para imágenes en 3D con microtomografía.....	86
Figura 63. . Modelos esquemáticos de la evolución cinemática entre las placas tectónicas (Norte América, Caribe y Cocos) al sur de México, donde a) proceso de “Pull-up” y b) Proceso de “Zipper”. Tomada de Authemayou, <i>et al.</i> , (2011).....	89
Figura 64. Corte esquemático N-S de lado Oeste del yacimiento geotérmico Tacaná, en donde se puede observar la interacción de las fallas con los flujos de los fluidos (mezcla geotérmica y meteórica). Con una fuente de calor aproximadamente a los 4 Km de profundidad, en un círculo negro se señalan las principales manifestaciones hidrotermales. Y las líneas negras corresponden a fallas de tipo lateral izquierdo y Fallas Normales. Nota. El corte es paralelo a la Falla Normal río Coatán.....	90

## **Lista de Tablas**

Tabla 1. Lista de las muestras que se analizaron en el laboratorio de Estudios Isotópicos de CeGeo- Campus Juriquilla de la UNAM. El método es $U^{238}$ – $Pb^{206}$ en zircones de rocas plutónicas.....	21
Tabla 2. Muestra los valores obtenidos de permeabilidad primaria para las muestras de Tacaná, en donde se obtuvieron datos de porcentajes de volumen de poro, tamaño de poro, y la permeabilidad en tres direcciones (x,y,z).....	85



## Introducción

La distribución de los aparatos volcánicos en México se encuentran directamente relacionados con la dinámica activa de las placas tectónicas presentes, que por su interacción producen emisiones de calor anómalo en zonas fracturadas; dicha energía calorífica puede ser aprovechada para la generación de energía eléctrica. Un ejemplo claro es la energía geotérmica, que en superficie se evidencia con manifestaciones hidrotermales o fumarolas (Gonzales-Partida *et al.*, 2015). Las características tectónicas de la zona nos relacionan las placas de Norte América, El Caribe y Cocos en donde tenemos sismicidad y vulcanismo reciente.

El complejo volcánico Tacaná (CVT) pertenece al extremo noroeste del Arco Volcánico Centro Americano (AVCA) (Sapper, 1896; 1899; Donnelly *et al.*, 1990), que se localiza entre México y Guatemala en donde las fallas regionales y el fracturamiento secundario son producto de la dinámica de las placas tectónicas que interactúan con el calor almacenado en las rocas y los fluidos produciendo manifestaciones hidrotermales (Truesdell y Lippmann, 1990), estas zonas en donde se encuentran anomalías geotérmicas y fracturamiento en las rocas, son lugares de interés para los posibles yacimientos geotérmicos.

Los yacimientos geotérmicos de acuerdo a su forma de transferencia de calor se clasifican en: conductiva para los yacimientos de media a baja entalpia o convectiva para los yacimientos de alta entalpia, los cuales pueden tener diferente características como fuente de calor, elementos geológicos como fracturas que controlan el transporte y el almacenamiento de calor así como el flujo de los fluidos (Gutiérrez-Negrín, 2015). Cuando un yacimiento geotérmico se encuentra en rocas ígneas, la permeabilidad es secundaria de tipo tectónico debido a la baja permeabilidad de estas rocas que evoluciona por efecto de los esfuerzos tectónicos y geotérmicos.

En el caso de la deformación de tipo frágil (temperaturas entre 400-450 °C; Gonzales-Partida *et al.*, 2015) con una fuente de calor cercana a la superficie, la permeabilidad tiende a aumentar, mientras que la expansión térmica, la deformación dúctil y el depósito de minerales hidrotermales o arcillas tienden a sellar o disminuirla considerablemente. Algunos de los escenarios estructurales favorables para los sistemas geotérmicos pueden ser: 1) las zonas de

relevo (step-over o rampas de relevo), 2) segmentos entre dos fallas normales superpuestas con fallamiento menor vinculando las fallas principales, 3) las terminaciones de fallas que tienen un comportamiento de ruptura en múltiples planos en forma de cola de caballo, 4) las zonas de sistemas de fallas normales opuestas que generan múltiples intersecciones de fallas en el subsuelo y 5) en las intersecciones de fallas entre fallas normales y oblicuas (Faulds *et al.* 2011; 2012; 2015). El estudio de la dinámica de cualquier escenario estructural es muy importante en la construcción de un modelo geotérmico que ayude a identificar las zonas más favorables para el aprovechamiento de la energía geotérmica. Estudios geológico-estructurales demuestran que no siempre el centro de la falla es la porción de más alta permeabilidad (Caine *et al.*, 1996; Backers y Moeck, 2015 en Olvera *et al.*, 2016), ya que puede sellarse por mineralización secundaria a medida que evoluciona la falla, por el contrario, los mismos estudios resaltan que la *damage zone* que incluyen pequeñas fallas, vetas y hendiduras (Bruhn *et al.*, 1994: en Caine *et al.*, 1996) las que permiten el paso de los fluidos (Bruhn *et al.*, 1994; en Caine *et al.*, 1996; Brackers *et al.*, 2015.), en particular su configuración estructural es más favorable para la dinámica de un campo geotérmico.

Los datos presentes en este trabajo, tiene como objetivo explicar desde una perspectiva mecánica la causa y efecto de los sistemas de fallas que pueden representar un escenario favorable para la exploración geotérmica, como las intersecciones de falla que corresponden a una configuración de fallas favorables en campos geotérmicos (Brackers *et al.*, 2015). Tomando en cuenta las condiciones geomecánicas de las rocas del yacimiento en el CVT, se presenta un estudio sobre el fracturamiento y la cinemática de las rocas involucradas en un posible yacimiento geotérmico ligado al CVT, presentado en tres capítulos esenciales, en el primero se describen las generalidades del área de estudio, como antecedentes objetivos y justificación, en el segundo apartado se presentan los aspectos teóricos relevantes en geología estructural, geotermia, y cinemática, y por último los resultados y conclusiones.

## 1.2 Estado del Arte

El extremo sur de la República Mexicana es una de las zonas con mayor actividad sísmica y vulcanológica debido a su interacción entre tres placas tectónicas, en esta zona se encuentra el volcán Tacaná, que debido a su constante actividad es uno de los volcanes que ha sido estudiado desde diferentes puntos de vista. Algunos de los primeros trabajos geológicos, fueron llevados a cabo por Dollfus y De Mont-serrat (1868), quienes realizaron expediciones geológicas en México y Centro América, Sapper (1896; 1899) reportó al volcán Tacaná como el último aparato volcánico localizado al extremo noroeste de Cinturón Volcánico Centro Americano (AVCA). De acuerdo a Mülleried (1951) el volcán es de edad Cuaternaria y que está sobre rocas metamórficas Precámbricas, rocas intrusivas, granitos y dioritas. De la Cruz *et al.*, (1985) llevaron a cabo un trabajo para la (Comisión Federal de Electricidad) CFE, donde reconocen cuatro episodios andesíticos y tres flujos piroclásticos, localizan al W-SW una zona de fumarolas con temperaturas entre 82 y 94 °C, manantiales termales de 40 a 55°C y temperaturas inferidas en el subsuelo de 212 a 290°C (por medio de geotermómetros). Por otro lado, reportaron lineamientos que afectaron el basamento en un radio de 25 km con direcciones preferenciales de N 5°-15° y N25°-35° (Figura 1) al norte del área.

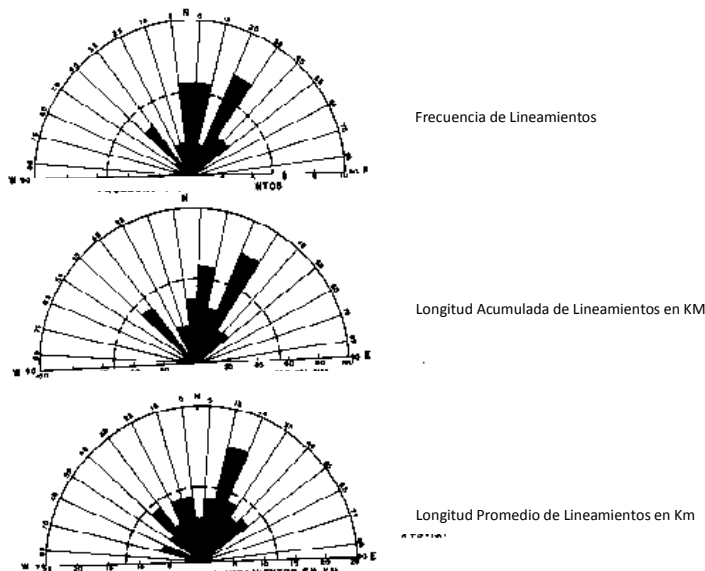


Figura 1. Direcciones preferenciales de lineamientos, para el basamento local. Tomada de De la Cruz *et al.*, (1985).

## Capítulo 1. Generalidades

De acuerdo con las condiciones geológicas y geoquímicas en donde proponen un reservorio geotérmico dentro de los colapsos caldericos y alojado en rocas de basamento compuesto de intrusivos fracturados. De La Cruz *et al.* (1989) realizaron un estudio sobre los cambios químicos del agua (aumento en sulfatos) en el manantial termal Agua Caliente de 215 a 1,255 mg/l, que es interpretado como el precursor de una explosión freática en mayo de 1986, también sugieren la existencia de dos cuerpos de agua a diferente profundidad.

Mercado y Rose (1992), publicaron una evaluación preliminar de la peligrosidad del volcán Tacaná, donde su último periodo de actividad freática comenzó en diciembre de 1985, de acuerdo al análisis de las cenizas emitidas las cuales indican que estas erupciones fueron freáticas. Dichos autores se basaron en observaciones históricas de volcanes similares (Arenal Costa Rica, Santa María Guatemala, Santa Helena, EUA), llegan a la conclusión que podría ocasionar daños en la población aledaña, que dependen de la época del año, y la dirección de los vientos predominantes. Los daños con mayor importancia provienen de las inundaciones y lahares derivados de la actividad del Tacaná.

Macías *et al.*, (2000) propusieron a Tacaná como un complejo volcánico constituido por tres edificios volcánicos (Chichuj, Tacaná y San Antonio), también identificaron como la erupción más reciente fechada en 1,950 años AP, producido por el volcán San Antonio al que denominaron depósito Mixcum.

Guzmán-Speziale (2001), utilizando métodos sísmicos calculó los tensores de deformación en 8 mm/año a lo largo de los graben del norte de América Central, mientras que para los movimientos relativos entre las placas de Norteamérica y el Caribe a lo largo del sistema de fallas Polochic-Motagua propone desplazamiento en el orden de 20 mm/año.

Rouwet *et al.*, (2004), menciona que muchos de los manantiales alrededor del volcán tienen una composición rica en CO<sub>2</sub>, que puede interpretarse como una mezcla entre componentes de aguas profundas ricas en SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> y aguas meteóricas diluidas.

Rouwet (2006), presentó su tesis doctoral, mostrando datos geoquímicos comparativos entre los volcanes de Chichón y Tacaná en Chiapas, presentando modelos conceptuales de ambos y haciendo la distinción de acuíferos por medio de elementos traza y cálculo de la relación

gas libre/agua en manantiales burbujeantes. Estiman el potencial geotérmico de Tacaná con 10.5 MW con una descarga total de aguas de 50 kg/s.

Guzmán-Speziale *et al.*, (2005), determinan la velocidad de deformación a lo largo del Arco Volcánico Centro Americano que tiene un vector compresivo de  $.7 \times 10^{-8}$  por año y orientación azimut  $357^\circ$ , la extensión orientada  $86^\circ$  con una magnitud de  $.82 \times 10^{-8}$  por año. Sugieren que los campos de deformación a lo largo del Arco Volcánico Centro Americano es el resultado de la compresión de Cocos y Caribe y la extensión en la región tras-arco a lo largo del norte de Centroamérica que se resuelve como falla Strike-slip a lo largo del arco.

García-Palomo *et al.*, (2006), realizaron una interpretación acerca de la evolución geológica del Complejo Volcánico Tacaná, en la cual describen cuatro estructuras alineadas NE-SW: Chichuj, Tacaná, Plan de las ardillas y San Antonio asociadas a eventos magmáticos entre el Eoceno temprano al Oligoceno inferior y durante el Mioceno temprano al Medio. Menciona tres principales sistemas de fallas en la zona del volcán Tacaná el más antiguo localizado al oeste con orientación NW-SE, el segundo alineado con el complejo volcánico de dirección NE-SW, y por último el más joven de dirección N-S.

Borjas (2006), describe 8 eventos de erupciones explosivas en los últimos 29 mil años, y describe inyecciones repetidas de magmas básicos dentro de la cámara magmática que son los mecanismos de activación de las erupciones explosivas.

Mora *et al.*, (2007), realizaron un trabajo geológico y geoquímico en el arco volcánico Chiapaneco, donde describe aparatos caracterizados por algunos domos volcánicos, un cráter de explosión, una estructura colapsada y un complejo dómico, con magmas calco alcalinos y de medio a alto contenido de K. relacionado con la subducción de Cocos siguiendo una geometría de una falla de tipo R' lateral derecha.

Andreani *et al.*, (2008), elaboraron una interpretación sobre el movimiento del bloque sur de México en el cuaternario, respecto al límite entre los bloques del sur de México (Graben de Centro América) y la placa de Norte América las cuales se encuentran conectadas por tres zonas de deformación: 1) Trastensión lateral-izquierda a través del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), 2) fallamiento a rumbo lateral-izquierdo a lo largo del este de CVTM y el área de Veracruz y 3) fallamiento inverso y de fallamiento a rumbo lateral

izquierdo en el área de Chiapas (Figura 2). También mencionan el movimiento dinámica en la rotación anti-horario del bloque Sur de México.

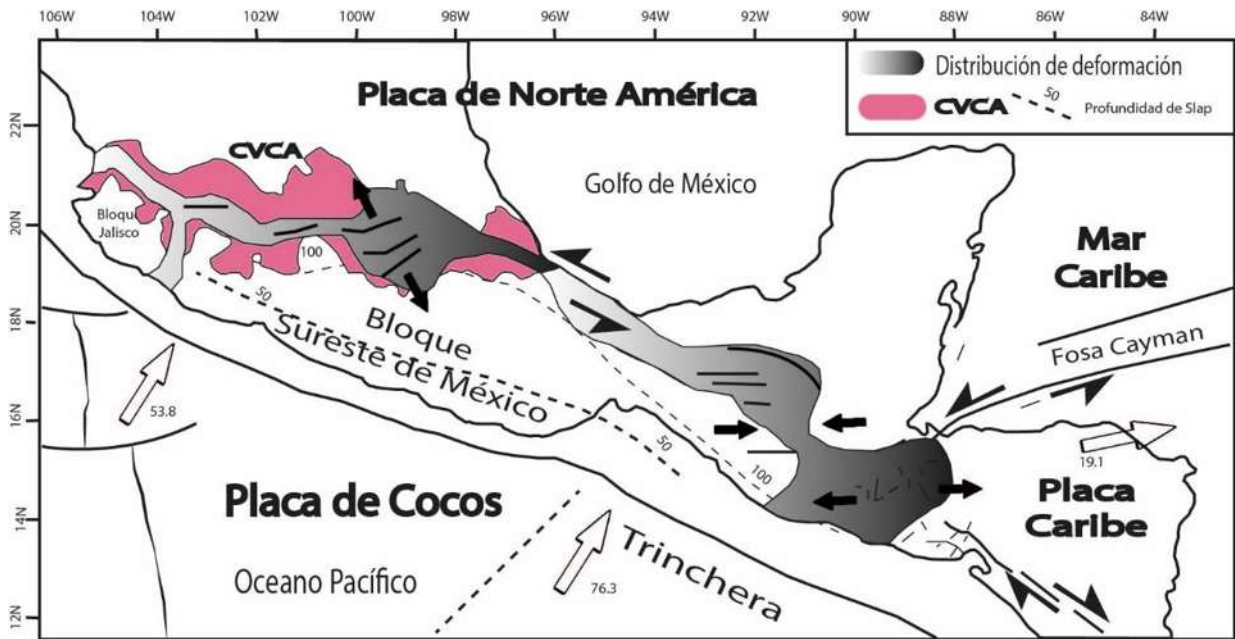


Figura 2. Mapa en donde se muestra el ajuste tectónico Cuaternario al sur de México, modificado de Andreani, 2008.

Rouwet *et al.*, (2009) realizan el estudio de la actividad hidrotermal del sistema volcánico Tacaná de dividido en 7 grupos al NW del Volcán entre los 1500 y 2000 msnm, y uno al sureste, entre el límite de las rocas cristalinas y los depósitos volcánicos, así mismo propone un modelo con un cuerpo magmático a profundidad  $> 4$  km sugerido por De la Cruz-Reyna *et al.*, (1989) y con dos acuíferos semi-independientes al NW del aparato volcánico.

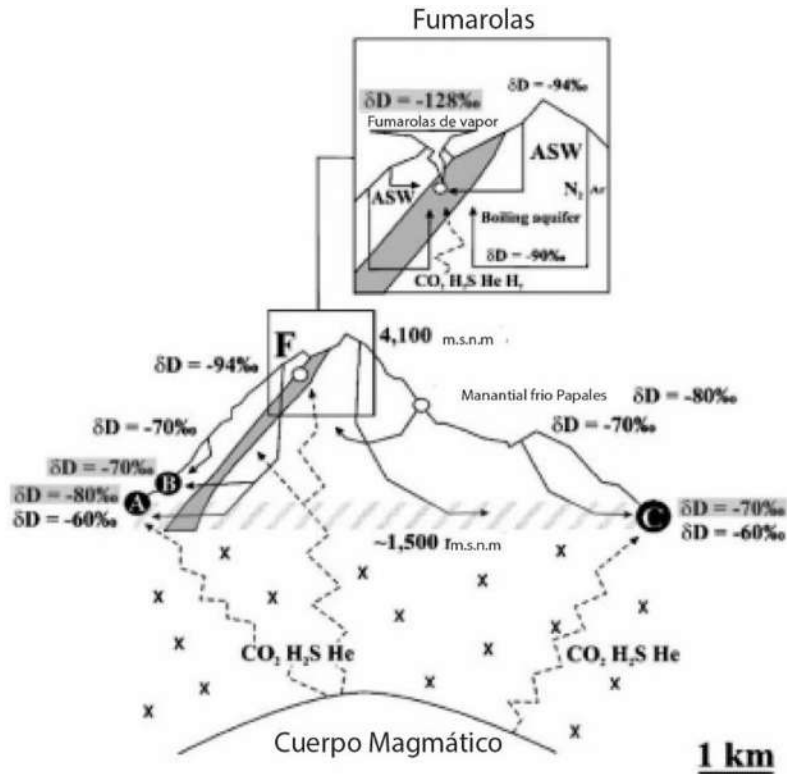


Figura 3. Modelo conceptual del sistema hidrotermal del volcán de Tacaná. Donde se muestra un cuerpo magmático > 4 km de profundidad (modificado de (De la Cruz *et al.*, 1989) con probable edad de 1989 A.P.).

Guzmán- Speziale (2010), realizó una investigación sobre fallas de rumbo entre las Placas de Norteamérica y el Caribe, donde la falla Ixcán se encuentra activa con generación de sismos de hasta 5.7 de magnitud en general E-W y la falla la Concordia con orientación NW-SE al sureste de México con un sismo reportado en 1902 de magnitud 7.6, y propone un modelo sismo-tectónico en ambos efectos son parte de la misma deformación asociado al límite de placas entre Norte américa y el Caribe en un sistema transpresivo.

Macías *et al.*, (2010) plantea un colapso paralelo a la dirección al esfuerzo  $\sigma_{min}$  a finales del Pleistoceno controlado por el campo de esfuerzos regional, dicho evento produjo una avalancha de escombros canalizada en el río San Rafael y trasladada 8 km río abajo. Surgiendo después de la caída, la emisión de lava Agua Zarca fechada en  $10 \pm 6$  ka por el método de ( $^{40}Ar/^{39}Ar$ ) y oleadas piroclásticas fechadas en  $10,610 \pm 330 / -315$  años AP por  $^{14}C$ .

Authemayou *et al.*, (2011), discute modelos sobre la dinámica en la unión de las placas Norte América, Caribe y Cocos, así mismo sobre el sistema de fallas Polochic-Motagua. El análisis cinemático sobre las fallas indica en el Mioceno una extensión al norte de la falla Motagua y acortamiento al sur de la misma. Proponen que la falla derecha Jalpatagua se fusiona con el fallamiento izquierdo del sistema de fallas Polochic-Motagua (Figura 4), dejando una estructura de sutura (falla Tonalá).

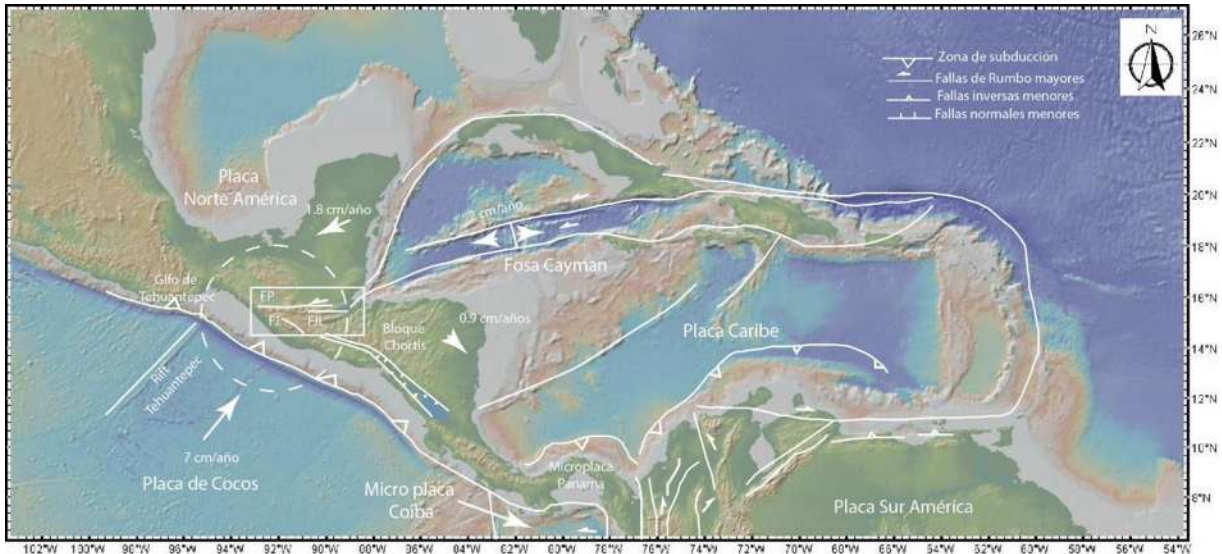


Figura 4. Ajustes cinemáticos de América Central, se muestran las principales fallas regionales con su movimiento relativo anual, tomado y modificado de Authemayou *et al.*, (2011).

Hiriart *et al.*, (2011) realizó un estudio sobre el potencial geotérmico en México, en el cual se refiere al Complejo Volcánico Tacaná (CVT), como un estratovolcán en el que pueden distinguirse cuatro etapas eruptivas andesíticas y tres flujos piroclásticos y un cráter final en su cima de .5 km de diámetro. La actividad termal se encuentra en el flanco oeste-suroeste entre los 3,200 y 3,600 msnm, con temperaturas superficiales de 82 y 94°C y el geotermómetro tipo D'Amore-Panichi calculó temperaturas de fondo de 212 a 260°C. Los manantiales termales se encuentran al NW del aparato volcánico con 40 a 55°C y temperaturas de fondo de 250 a 290°C medido con un geotermómetro de sodio-potasio. De acuerdo con el método de Volumétrico-Montecarlo (definido de manera más clara en el artículo citado) el potencial geotérmico es de 60 MW con una desviación estándar de 23 MW y un intervalo de confianza de 90% es de entre 21 y 99 MWe.



## Capítulo 1. Generalidades

Franco *et al.*, (2012) analizaron la cinemática al norte de América Central, entre Chiapas, Guatemala y el Salvador, con base a mediciones de datos de GPS y su relación con la subducción de la placa de Cocos. EL primer análisis se llevó a cabo en base a campos de velocidades regionales de GPS a lo largo de las estructuras volcano-tectónicas usando modelamiento elástico, los cuales mostraron los dominios entre las fallas Motagua con respecto a la falla Polochic, asociados a los movimientos relativos de las placas de Norte América y Caribe definida en 18-22 mm/año.

Mora *et al.*, (2013). Estudia los productos volcánicos del volcán San Antonio hace 1950 años, en el cual realizaron un estudio experimental donde calculan profundidades de aprox. 6 km de un magma andesítico con temperaturas  $\leq 900^{\circ}\text{C}$  antes de la erupción, y un magma dacítico que emergió después de 20 a 40 días a temperaturas aprox.  $825^{\circ}\text{C}$ .

Collard *et al.*, (2014) analizan estudios en los manantiales termales localizados al NW del edificio volcánico entre las cotas 1,500 a 2,000 msnm, con descargas de aguas enriquecidas en  $\text{HCO}_3$  y  $\text{SO}_4$  y rangos de temperatura entre 25 a  $63^{\circ}\text{C}$ . Estimando temperaturas a profundidad de  $250^{\circ}\text{C}$  por medio de geotermómetro de Na-K con descarga de fluidos ricos en cloruros de 14.8 g/s y la media el calor total es aproximadamente 9.5 MW.

Garduño-Monroy *et al.*, (2015), estudió los ajustes geodinámicos del volcanismo pre-volcánico en Chiapas, donde Tacaná representa el Limite Noroeste del Arco Volcánico de América Central (AVAC) que es interpretado como una zona de supra-subducción de magmatismo asociado con la subducción de la Placa de Cocos, debajo de Norte América y el Caribe.

### **1.3 Justificación**

La caracterización de un escenario geotérmico en cualquier ambiente implica un estudio geológico – estructural minucioso. En particular, el complejo volcánico Tacaná representa un escenario idóneo para la caracterización de la dinámica estructural y su relación con el potencial geotérmico. La región se encuentra dentro de la interacción de tres placas tectónicas (p. ej. Norte América, El Caribe, Cocos) que han provocado diferentes sistemas de fallas regionales con fracturamiento asociado. Se resalta el volcanismo activo la presencia de manifestaciones hidrotermales, de gases en superficie que son alimentadas por una fuente de calor a profundidad y apoyado con permeabilidad secundaria por las fracturas, nos alientan para definir el comportamiento de las diferentes características geológicas que nos permitan el mejor entendimiento de un posible potencial geotérmico en la zona.

### **1.4 Objetivo general**

- Caracterizar el potencial geotérmico del CVT con base a estudios geológicos y análisis cinemático de la zona.

#### **1.4.1 Objetivos particulares**

- Construir un mapeo geológico con base en las diferentes unidades litológicas en orden cronológico.
- Definir la cinemática de las fallas y fracturas a partir de estaciones mesoestructurales.
- Analizar la sismicidad de la zona por medio de mecanismos focales y su relación con la dinámica de las fallas.
- Diferenciar mineralógicamente los diferentes cuerpos graníticos presentes en el área de estudio, por medio de estudios petrográficos.
- Realizar dataciones radiométricas de las unidades litológicas basales por el método U-Pb en zircones.
- Calcular la permeabilidad primaria con ayuda de microanálisis de las muestras.
- Realizar un modelo conceptual del yacimiento geotérmico Tacaná.

### 1.5 Zona de estudio

El complejo volcánico Tacaná (CVT) se localiza la porción Sureste de México, compartiendo territorio entre el estado de Chiapas y la parte noroeste de la República de Guatemala, el volcán adquiere una altura máxima de 4110 msnm. Las principales rutas de accesos son: 1) en la parte Este de la ciudad de Tapachula, Chiapas se toma la dirección hacia la frontera con Guatemala en donde se encuentra la salida por la carretera No. 200 con dirección NE al poblado de Cacahoatán, siguiendo hacia el poblado de Santo Domingo hasta llegar a Unión Juárez, en donde se encuentran brechas, las cuales conducen al río Suchiate. Por otro lado, al norte de Tapachula siguiendo la Avenida 8 Norte que se une a la carretera federal Benito Juárez la cual conduce al poblado El Progreso. En la parte de Guatemala, la ciudad de Sibinal de localiza por la carretera No 12, siguiendo caminos de terracería hacia el punto llamado el muro o frontera con México (Figura 5).

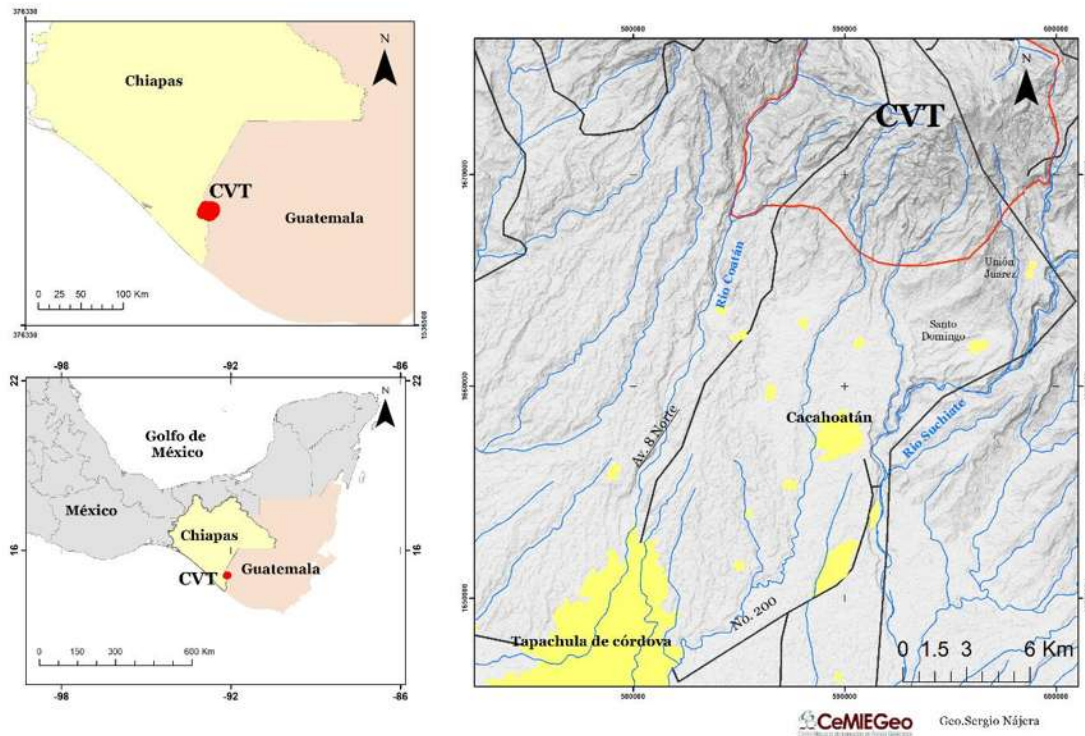


Figura 5. Localización del área de estudio Tacaná, Chiapas, México y principales vías de acceso desde la ciudad de Tapachula, la abreviatura CVT: Complejo volcánico Tacaná y la línea roja corresponde al aparato volcánico, la línea negra recta pertenece a la frontera entre México y Guatemala.

## 1.6 Hidrología

El Complejo Volcánico Tacaná se localiza en el extremo Sureste de México y la parte noroeste de Guatemala, forma parte del AVCA, el cual está conformado por una gran cantidad de aparatos volcánicos, estratovolcanes con magmas calco-alcalinos, conos de escoria, flujos piroclásticos, etc. desde el Eoceno al Reciente. El AVCA se extiende 1,300 km desde el límite México Guatemala hasta Costa Rica (Carr *et al.*, 1982; Donnelly *et al.*, 1990).

Con sus amplias costas, México recibe las aguas del Océano Pacífico y del Golfo de México, y en menor proporción del mar Caribe. Por su parte, los recursos hídricos en el estado de Chiapas representan el 30 % del total del país, son alimentados por los ríos Grijalva y Usumacinta de norte a sur, donde las mayores densidades se encuentran al norte de Tacaná.

En el área de estudio el arreglo hídrico se encuentra representado principalmente por drenajes paralelos, en grandes planicies rellenas de productos piroclásticos, fluviales y aluviales poco consolidados (Figura 6), los principales afluentes que comparte el estado de Chiapas y Guatemala son el Río Coatán en la parte Oeste del CVT y por el Río Sushiate al Este, que atraviesan grandes extensiones sobre rocas del basamento en las cuales es común encontrar bloques redondeados a subredondeados, debido a la fuerza y al transporte que han sufrido.

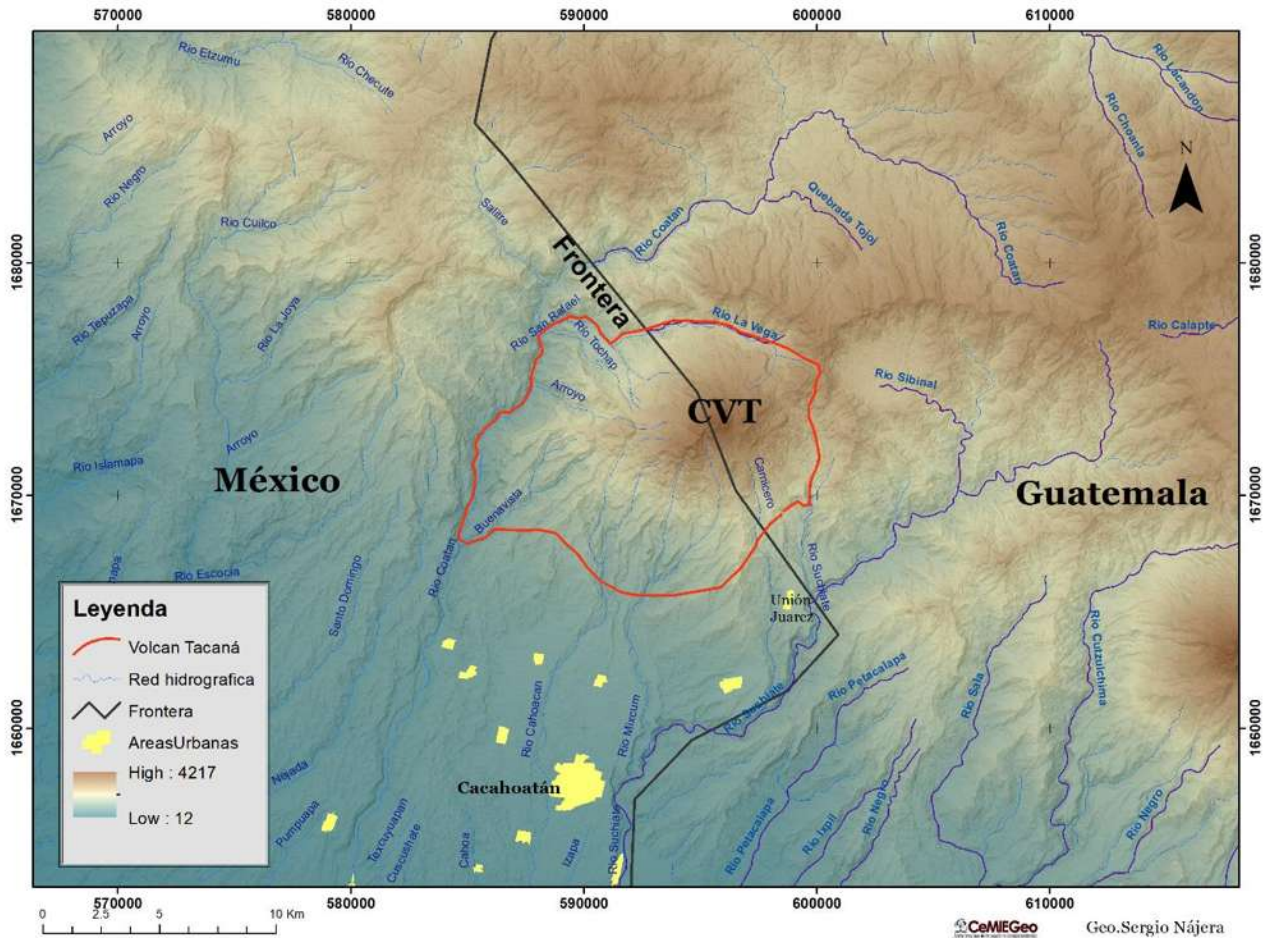


Figura 6. Muestra los principales Río que así como su geometría, en tonalidades café se muestran las mayores alturas y las tonalidades azules son las alturas menores con relación al nivel del mar, la línea roja representa el aparato volcánico, la línea negra representa la frontera México Guatemala y CVT: Complejo volcánico Tacaná.

### 1.7 Cuencas Hidrográficas

El área de estudio se encuentra dividida por depresiones fluviales, una de las más importantes para el sistema fluvial de Tacaná es la cuenca del río Coatan (figura 7), esta cuenca cuenta con 733 Km<sup>2</sup> de superficie de las cuales el 63% se ubican en territorio mexicano, con cotas de 0 a 2,700 msnm. Posee una extensa red hidrográfica principalmente en su parte alta, en Guatemala existen 34 corrientes de diversos tamaños, el río Coatan tiene una longitud de 23



km en territorio guatemalteco y 80 km del lado mexicano. La cuenca del río Coatán pasa por escasas durante la temporada de estiaje, y se pone en riesgo la disponibilidad de agua para el consumo doméstico en las zonas urbanas, esto mismo problema ocurre en la hidroeléctrica José Cecilio del Valle se abastece de este mismo (Cotler, 2010). La cuenca del río Coatán es importante para las zonas de recarga y el aporte de los fluidos en el yacimiento geotérmico, por lo cual es necesario conocer la morfología de la cuenca, el aporte y características químicas de los fluidos.

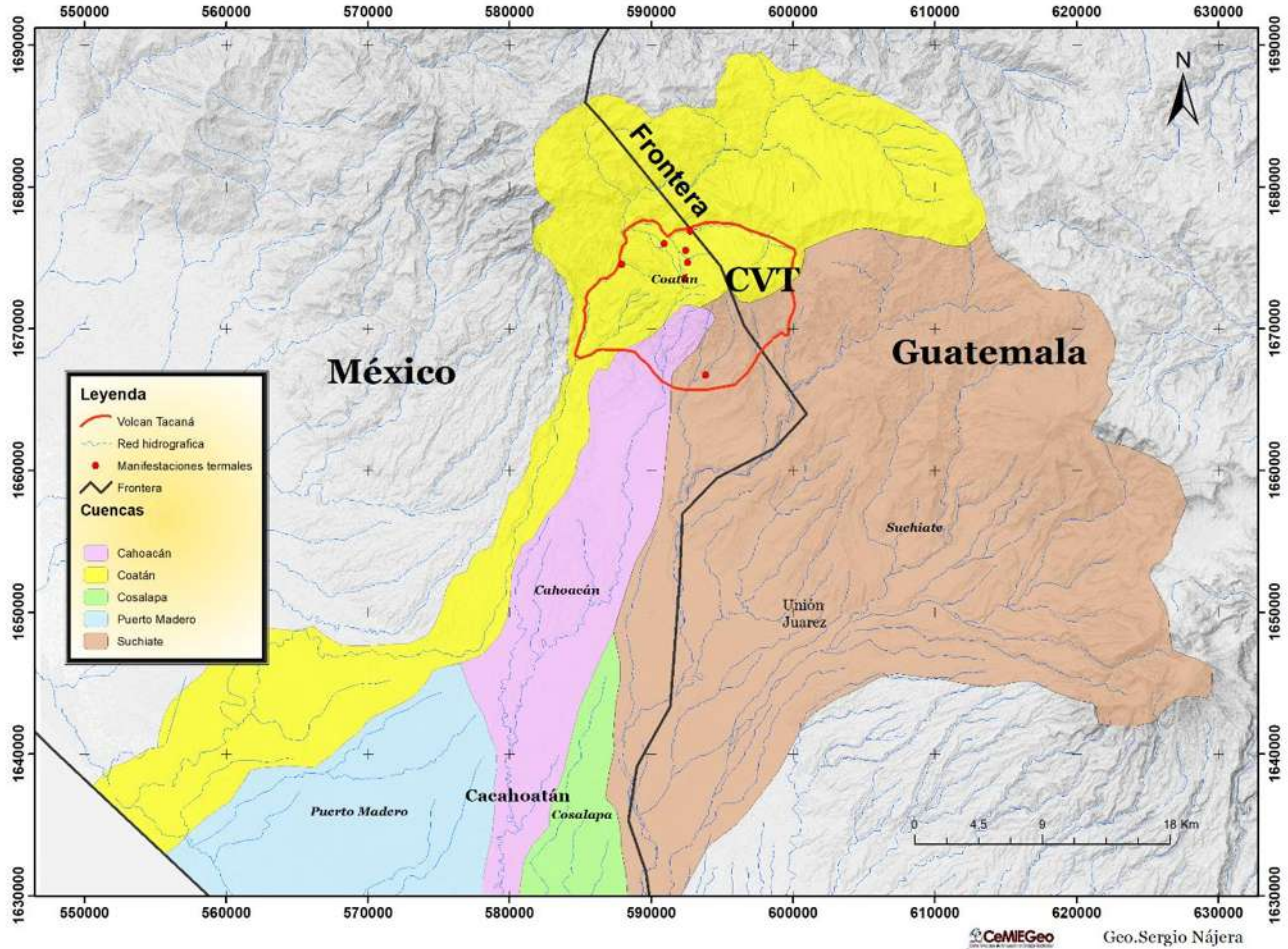


Figura 7. Muestra las diferentes cuencas entre México y Guatemala, tomado y modificado de UICN/Mario Rodríguez. En donde los colores representan las diferentes cuencas, como son: amarillo: Cuenca Coatán, rosa claro: Cuenca Cahoacán, verde: Cosalapa, azul: cuenca Puerto Madero y rosa oscuro: Cuenca Unión Juárez. Los puntos rojos representan las manifestaciones termales reportadas en la zona.

### **1.8 Clima y Vegetación**

El clima en la región de Tapachula y periferias del volcán de Tacaná en verano es de cálido húmedo con abundantes lluvias (40.24%), cálido subhúmedo con lluvias, de humedad media (30.82%), cálido subhúmedo con lluvias y humedad (17.2%), semi-cálido húmedo con abundantes lluvias (6.49%), templado húmedo con abundantes lluvias (5.25%). Con temperaturas media anual de 14 a 30°C y una precipitación media de 1,000 a 5,000 mm, esta humedad y precipitaciones son importantes para el aporte meteórico de fluidos al sistema geotérmico en profundidad. El mayor porcentaje del suelo se utiliza para la agricultura, siendo la siembra de café una de las principales actividades agrícolas. La vegetación es de bosque, manglar, pastizal inducido y tular (INEGI, 2008). Es evidente que la vegetación está estrechamente relacionada con la recarga y aporte de fluidos en el Estado, características que son favorables para la retención o almacenamiento de fluidos en el sistema.

## **Capítulo 2. METODOLOGÍA**

La metodología consistió en 3 etapas principales: 1) se basó en la recolección de datos científicos y sobre modelos de relieve, mapas geológicos, para la comprensión del área de estudio, 2) en esta etapa se realizaron actividades en las cuales se definieron características geológicas, mineralógicas y estructurales de la zona, con el trabajo de campo pudimos diferenciar las litologías presentes, identificar minerales hidrotermales, también se midieron estructuras como fallas y fracturas, y se recolectaron muestras para un posterior análisis 3) en los trabajos de laboratorio se analizaron muestras petrográficamente, se realizaron dataciones radiométricas, y se examinaron micro-permeabilidad de granitos. Como parte de la primera etapa, integraron todos los resultados de campo y laboratorio en este documento:

### **2.1 Trabajo de gabinete**

El trabajo de gabinete consistió en recopilación de información bibliográfica de la zona, se compilaron artículos científicos en diferentes áreas de las Geociencias, publicaciones de tesis, mapas, fotografías aéreas y modelos digitales de elevaciones (MDE), contemporáneamente se produjeron mapas morfológicos y se elaboraron diferentes mapas digitales con la ayuda de insumos cartográficos como vectores e imágenes Raster con un pixel de 12.5. Se realizaron diferentes mapas interactivos como: elevaciones, pendientes, mapas geológicos preliminares, lineamientos, entre otros. También se elaboraron secciones geológicas, para proponer una columna estratigráfica, y modelos de rosetas con la ayuda de Softwares como Arc Gis 10.3, Global Mapper 17, Surfer 13, Adobe Illustrator, y para la representación gráfica de datos estructurales se utilizó el software de uso gratuito Win-Tensor 5.0 ([http://www.damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor\\_download.html](http://www.damiendelvaux.be/Tensor/WinTensor/win-tensor_download.html)), Spheristat, entre otros (p. ej. Figura 8).



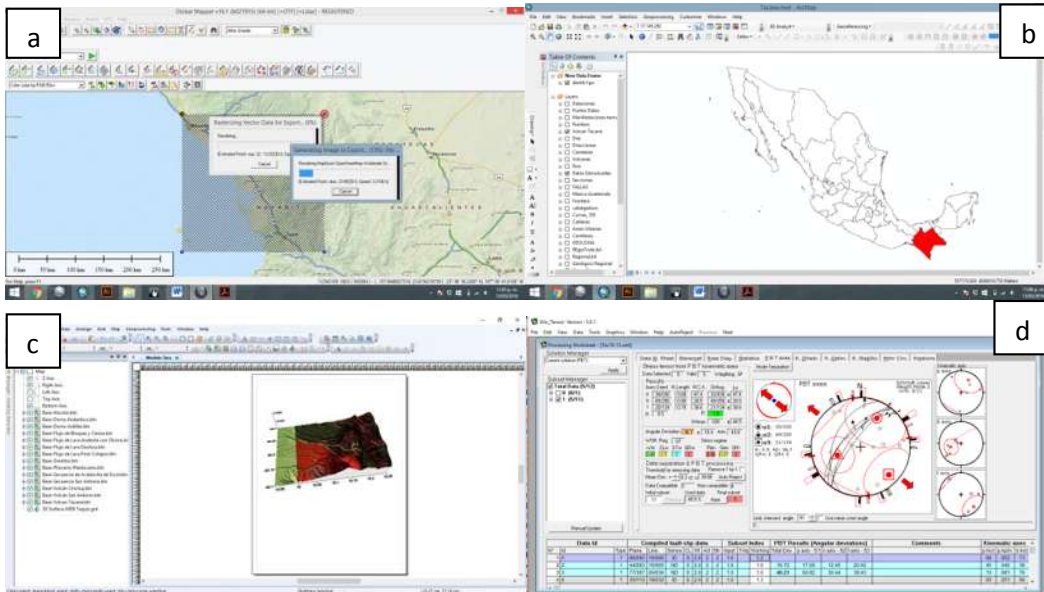


Figura 8. La representación gráfica y geoespacial de los elementos adquiridos se llevó a cabo con la ayuda de diferentes softwares como: a) Global Mapper 17 con la que se realizaron asignación de coordenadas, ríos y MDE b) Arc Gis 10.3 en este software se realizaron los diferentes mapas, como geológico, hidrológico, de cuencas, mapa de localización, entre otros, c) Surfer 13 en el que se realizó un modelo conceptual en 3D y d) gráfica de los datos estructurales como fallas en el software Win\_tensor 5.0.1.

Por otro lado, se realizó el análisis de los sismos históricos en la zona, por medio de la recopilación de los datos en los catálogos de Global CMT Project desde 1976 al 2015. Este se realizó en el área entre las coordenadas geográficas: Latitud 14°N a 18°N y longitud 88° W a 94° W, en donde se diferencian las fallas Normales, Inversas y de tipo lateral. Posteriormente se generaron dos perfiles cruzando por el CVT perpendiculares entre sí, en donde se pudieron observar las profundidades de los epicentros de cada evento.

## II.2 Trabajo de campo

Con la ayuda de mapas preliminares (p. ej. MDE, mapa geológico) se levantaron 68 estaciones estructurales en los alrededores del CVT, las cuales consistieron en la medición de direcciones de fallas con cinemática (indicadores cinemáticos) y fracturas, en estas estaciones se describieron cada una de las unidades litológicas presentes, considerando sus

## Capítulo 2. Metodología

características composicionales, textura, mesostasis, mineralogía, grado de alteración. Al mismo tiempo se comprobaron los contactos geológicos, así como su relación espacio-temporal. La ejecución de las estaciones estructurales se llevó a cabo en los sitios en donde se podían ver mejor los afloramientos, en donde la roca se encontraba expuesta para poder diferenciar los diferentes sistemas, midiendo fallas y fracturas, tanto en la parte norte como en la porción sur de la zona a lo largo de los ríos Suchiate y Coatán clasificándolas con una clave única, donde se tomaron datos de Rumbo, Echado, Inclinación y estrías en caso de que las presenten (Figura 9). Se tomaron las coordenadas de cada estación para ubicarlas espacialmente, en algunos casos se tomaron muestras de roca sana considerando la diferencia de texturas a simple vista o composicionales para su posterior análisis petrográfico en laboratorio y también para el método radiométrico de datación U-Pb en zircones.

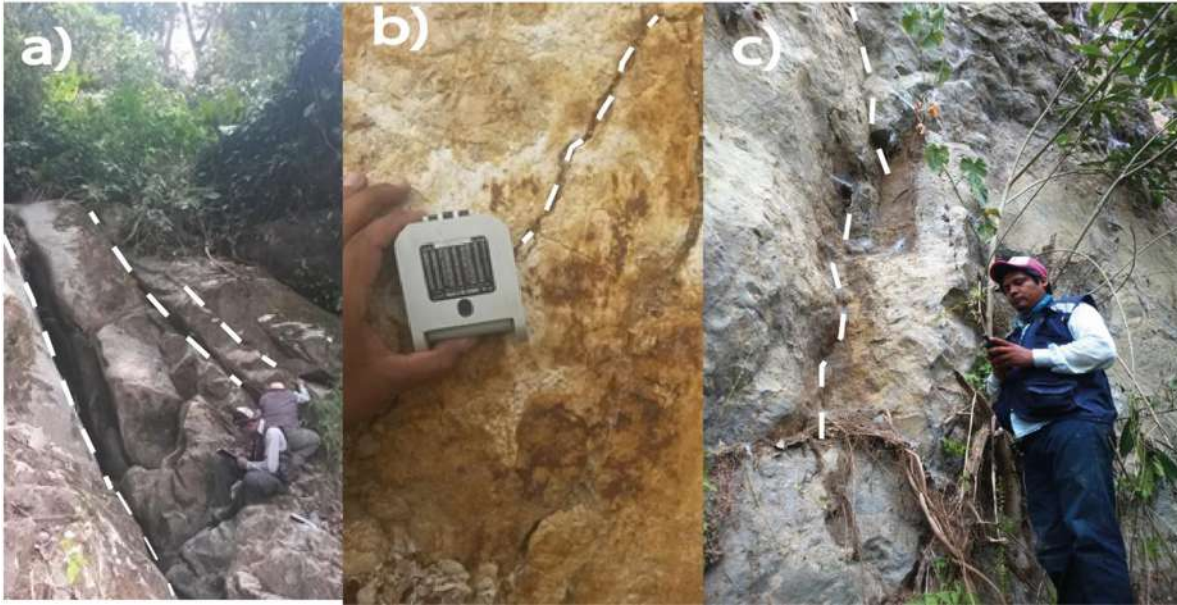


Figura 9. Se muestra en la figura a) el levantamiento de una estación estructural, en donde se remarcen las estructuras con líneas punteadas fracturas abiertas en el poblado de la Boquilla b) afloramiento con alteración hidrotermal y oxidaciones, en donde se tomaron planos de fallas, con fracturas rellenas tomada en municipio de Pavincul, y C) líneas punteadas señalando fracturas en depósitos volcánicos adelante del poblado Coatán.

### **2.3 Trabajo de laboratorio**

El trabajo de laboratorio incluye un análisis petrográfico mediante la descripción detallada (p. ej. textura, componentes mineralógicos, minerales de alteración) de 13 láminas delgadas, las cuales se escogieron por sus diferencias texturales, mineralógicas en muestra de mano y tomando muestras sanas.

Las láminas delgadas se elaboraron en el laboratorio de laminación del Instituto de Geofísica de la UNAM unidad Michoacán, de acuerdo a los estándares (para mayor detalle revisar [http://www.minsocam.org/msa/openaccess\\_publications/Thin\\_Sctn\\_Mcrscopy\\_2\\_rdc\\_d\\_spn.pdf](http://www.minsocam.org/msa/openaccess_publications/Thin_Sctn_Mcrscopy_2_rdc_d_spn.pdf)). Se resalta la importancia de hacer láminas con un espesor de 30 micras y hacer un pulido final para su mejor visualización y buen análisis. A continuación se describe de manera puntual los pasos necesarios para la elaboración de láminas delgadas:

- 1.- Tomando una muestra de mano (p. ej. figura 10a) las cuales se recolectaron en campo se inicia reduciendo las muestras con la ayuda de una pica o martillo para obtener un tamaño de la muestra de aproximadamente 10 cm de diámetro para su mejor manejo.
- 2.- Pasamos la muestra por una cortadora manual de disco enfriada por agua con la que hacemos cortes rectangulares de tamaño aproximado de 2.5x4.5 cm (figura 10d), obtenemos esquirlas o galletas de las diferentes muestras (figura 10c).
- 3.- Devaste de los especímenes rectangulares mediante el uso de abrasivos de diferente granulometría (figura 10b).
- 4.- Pegado en portaobjetos con las esquirlas mediante pegamento a base de resina y endurecedor.
- 5.- El siguiente paso es hacer el corte en una cortadora de precisión (figura 10e), en la cual tuvimos el cuidado de dejar las muestras muy delgadas de 2 a 3 mm, posteriormente regresamos al pulido en los vidrios con abrasivos, hasta llegar a un espesor de 30 micras. Esto nos permitirá, identificar a través de un microscopio petrográfico las propiedades ópticas de los minerales.

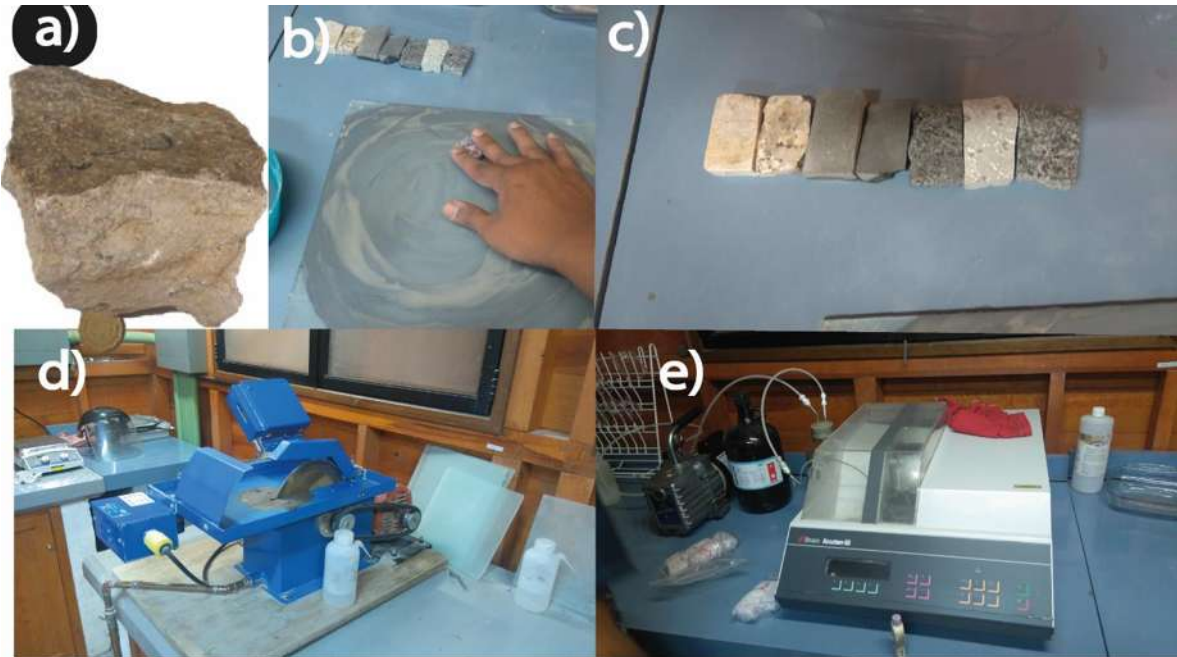


Figura 10. Muestra las diferentes herramientas con las que cuenta el laboratorio de laminación para realizar secciones pulidas, en donde a) muestra una muestra recolectada en campo, b) pulido de muestras en vidrio con abrasivo, c) galletas o esquirlas de diferentes litologías a analizar, d) cortadora con disco simple, e) cortadora de precisión.

La preparación de las muestras para su fechamiento se realizó por el método radiométrico de U-Pb en zircones en donde se tomaron muestras de basamento alrededor del CVT (las muestras aparecen en la tabla 1), en donde las muestras se pulverizaron con la precaución de no contaminar con otras muestras, se separaron los zircones para su análisis en el laboratorio de estudios isotópicos de la UNAM campus Juriquilla.

Las dimensiones de las muestras son de aproximadamente 2 kg. ya que deberá ser representativa y tener el número suficiente de mineral que necesitamos (50 Zircones). Las muestras seleccionadas son sometidas a un tratamiento mecánico, el cual consistió en trituración de la muestra reduciendo su tamaño en primera por medio del golpe de un martillo para tener tamaños de alrededor de 5 cm., una vez obtenido el tamaño, pasamos a una micro trituradora de Quijada (Figura 11a), donde se muelen las muestras a un tamaño de 1 a .5 cm., posteriormente con la ayuda de un mortero de agata (figura 11 b) reduciremos el tamaño de los granos hasta lograr que llegue a el tamaño que requerimos haciendolo pasar por distintas mayas de los tamices (Figura 11 c) hasta llegar a la malla 60.

## Capítulo 2. Metodología

Tabla 1. Lista de las muestras que se analizaron en el laboratorio de Estudios Isotópicos de CeGeo- Campus Juriquilla de la UNAM. El método es  $U^{238} - Pb^{206}$  en zircones de rocas plutónicas.

Zircones	X	Y	Z	Roca
Tac16-22	602279	1673804	2571	Granito
Tac16-03a	586074	1673880	1084	Granodeorita
Tac16-03a AO	599951	1664956	1009	Granodeorita
Tac16-13a	586676	1677308	1416	Granito
Tac16-07	598324	1660988	712	Granodeorita
Tac16-35	585485	1685188	2074	Granodeorita

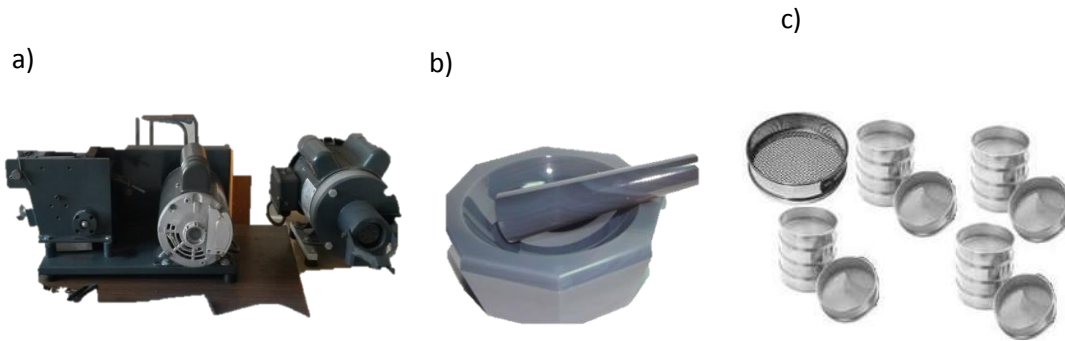


Figura 11. Se muestran los materiales de molienda de laboratorio en donde a) microtriturador de Quijada, b) mortero de agata y c) tamices de diferentes mallados.

Los zircones son minerales con una densidad de  $4.6 \text{ g/cm}^3$ , los cuales son más pesados que minerales formadores de roca ( cuarzo  $2.45 \text{ g/cm}^3$  o Feldespatos  $2.55 \text{ g/cm}^3$ ) por este motivo se se hizo una separación por densidad, haciendo circular agua y agitando circularmente la batea (Figura 12a), en donde separaremos los minerales arcillosos . Por ultimo dejaremos los minerales residuales y más densos en una caja petri con el objeto de secarlo en un horno industrial a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  aproximadamente 1 día. Para finalizar se separan los minerales por medio de un microscopio estereocópico (12 c) y se alinean en una base(Figura 12b). El método del fechamiento se realiza en el laboratorio de estudios isotópicos en el Centro de Geociencias de la UNAM.



## Capítulo 2. Metodología

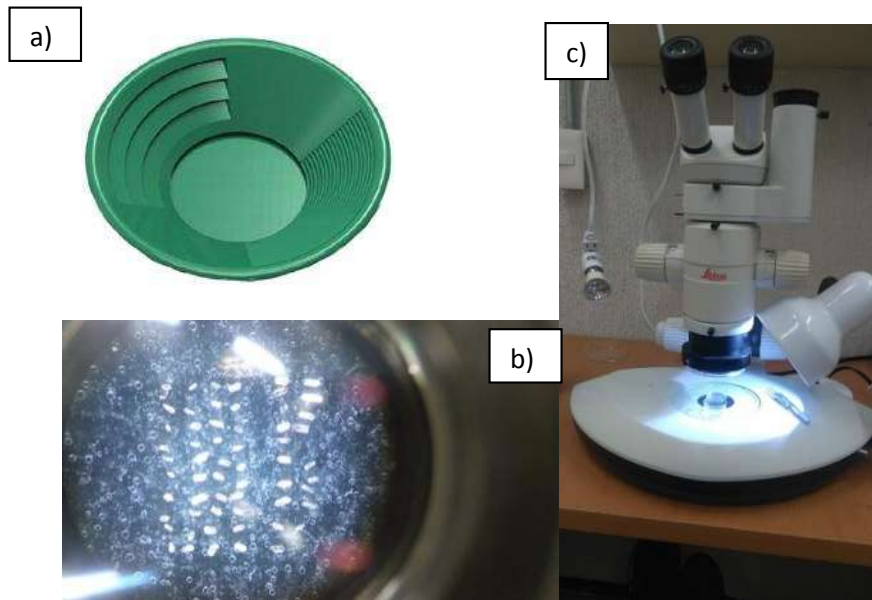


Figura 12. Muestra en a) la batea que se utilizó para realizar el searado por densidad y en b) zircones separados de la muestra, C) microscopio marca Leyca.

Para analizar la permeabilidad primaria de las rocas se realizó el estudio en 4 muestras alrededor del volcán, en las cuales se realizaron imágenes 3D con la ayuda de microtomografía en pequeños núcleos de 6 mm de diámetro, con lo cual se obtuvo una resolución de  $6\mu\text{m}$ , con el objeto de estudiar la microporosidad.

La redacción de la tesis se lleva a cabo a partir de la recopilación de información en gabinete, a medida que se van obteniendo datos, a través de las etapas se van ingresando al texto final.

## **Capítulo 3. Marco Teórico**

### **Capítulo 3. MARCO TEÓRICO**

. El planeta Tierra actualmente se encuentra en decadencia, por toda la contaminación que se genera día a día al consumir energías tradicionales como las termoeléctricas en donde la quema de hidrocarburos fósiles o carbón producen en gran medida las emisiones de CO<sub>2</sub>. Por lo cual es necesario en entendimiento de diferentes fuentes de energía, el siguiente trabajo se encuentra relacionado hacia el estudio y conocimiento de los procesos que se llevan a cabo durante una exploración Geológico-estructural para la generación de energías limpias, en particular sobre la geotermia

#### **3.1 Geotermia**

La energía térmica producida y almacenada en el interior de nuestro planeta proviene de dos fuentes principales, la primera como remanente de la formación de la Tierra ocurrida hace 4, 500 Ma. Proveniente desde el núcleo. Y la segunda por el decaimiento radiactivo de elementos isotópicos como el Uranio, Torio y Potasio; por lo tanto, el calor total de la Tierra es del orden de 12.6 billones de exajoules, se calcula que la corteza terrestre contiene 5 mil 400 millones de exajoules (Gupta *et al.*, 2007 citado en Santoyo y Barragán, 2010), el aprovechamiento de esta energía calorífica es conocida como Geotermia.

Las fumarolas, géiser y fuentes termales son fenómenos observables en superficie que denotan un calor proveniente del subsuelo, estas manifestaciones viajan hacia la parte superior de la corteza terrestre y en muchas ocasiones no llegan a ser visibles. Estas pueden ser estudiadas por métodos indirectos, que nos ayudaran a tener un mejor panorama de las anomalías térmicas del Planeta Tierra. Por lo tanto, para un mayor entendimiento en la exploración y explotación de los yacimientos geotérmicos, debemos conjuntar conocimientos y técnicas de ciencias como geología, geofísica, geoquímica, hidrología, vulcanología, tratando de innovar sobre técnicas que nos permitan mitigar error en la explotación del yacimiento.

### Capítulo 3. Marco Teórico

El calor del planeta es suficiente para impulsar el movimiento de las placas tectónicas, que es un movimiento lento de la capa más rígida del planeta terrestre, que impulsan los procesos de la construcción de montañas, edificios volcánicos, manantiales termales (Glesley, 2014) la teoría de tectónica de placas trata acerca de la dinámica de la capa más externa de la tierra, conocida como litosfera, que incluye a la corteza y la parte superior del manto. Según la teoría, esta se conforma por una docena de grandes placas y otras subplacas de menos tamaño; las cuales se mueven unas con respecto de otras y en sus bordes interactúan entre sí de manera convergente, divergente o deslizándose entre ellas. Los contactos son zonas de intensa actividad sísmica, volcánica, y por consecuencia de anomalías geotérmicas (figura 13) que pueden ser aprovechadas por la industria (Quijano, 2007).

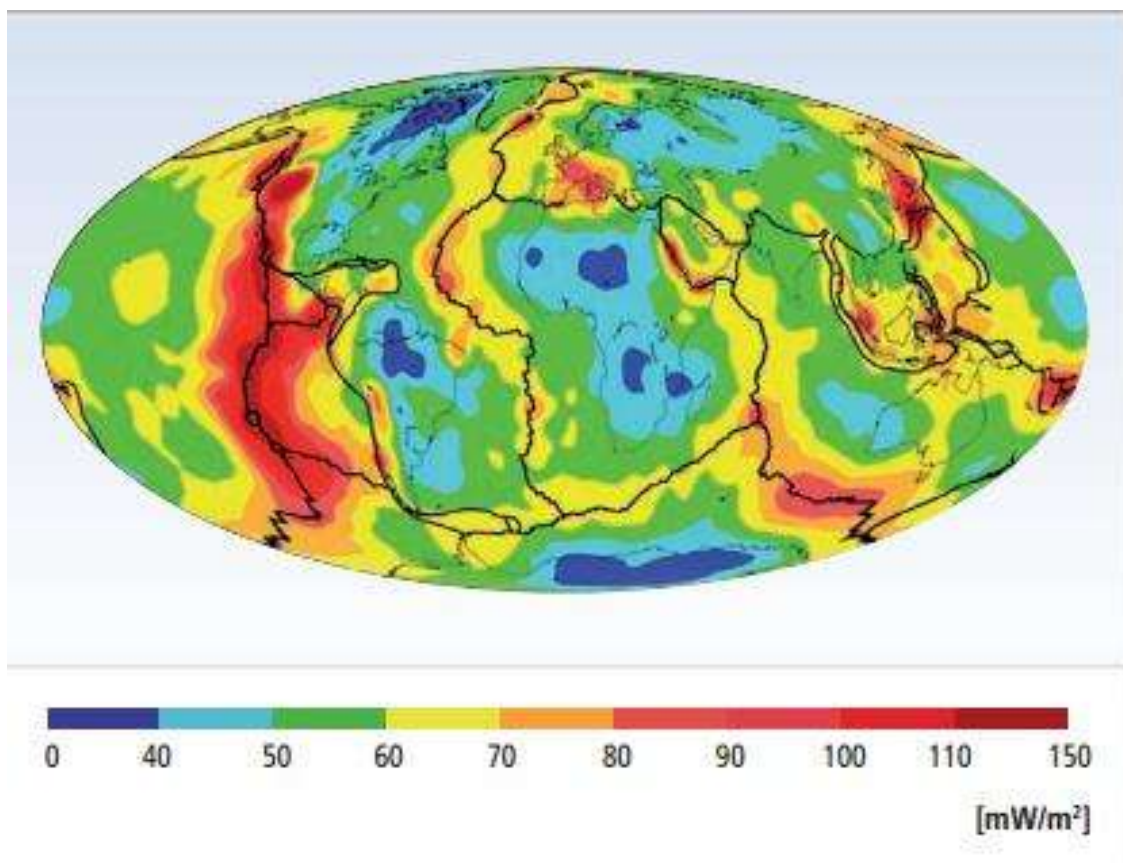


Figura 13. Mapa de anomalías del flujo de calor en  $\text{mW/m}^2$  en los límites de placas, los colores rojos señalan flujos de calor altos y los tonos azules flujos de calor bajos, medidos en  $\text{mW/m}^2$ . (Tomado de Goldstein y Hiriart, 2012).



### **Capítulo 3. Marco Teórico**

La mayoría de los reservorios geotérmicos de alta temperatura se encuentran en los bordes de las placas tectónicas, con algunas excepciones para las manifestaciones intraplaca como puntos calientes, ya que los márgenes de placas se originan procesos magmáticos que constituyen la fuente de calor los sistemas geotérmicos (Quijano, 2007). En los ambientes divergentes se genera adelgazamiento de la corteza y presencia de magmas básicos principalmente, y en los márgenes convergentes se forman cámaras magmáticas someras de composición ácida.

Los sistemas geotérmicos se definen por una combinación de parámetros geológicos que controlan su ubicación, y por lo tanto un escenario es representado por parámetros tanto estratigráficos o geológico estructurales particular, además de caracterizarse por la roca fuente, la roca del depósito y la trampa estratigráfica (Negrín, 2015).

Para el siglo XIX en Larderello, Italia, se da el inicio de la industria geotérmica en donde se extraía ácido bórico evaporando el agua caliente de los manantiales. Francesco Landarel en 1827 inventó un proceso de evaporación usando energía de la misma agua caliente. Después esa energía la transformo en energía mecánica mediante un sistema rudimentario de bombeo del agua con inyección de vapor. Para 1904 se llevó acabo el primer intento de generar electricidad a través de vapor (figura 14).

Entre 1910 y 1940 el vapor de baja presión fue utilizado para la calefacción en invernaderos, edificios, industrias y residencias en la Toscana. Por su parte otros países también empezaron a desarrollar sus recursos geotérmicos a escalas industriales. En 1928 Islandia, también inició la explotación de sus fluidos geotérmicos (agua caliente) para calefacción doméstica (Tasillas, 2011).

### **Capítulo 3. Marco Teórico**



Figura 14. Maquina usada en Larderello en 1904 para la generación de energía eléctrica mediante vapor caliente, con su inventor el Principe Piero Ginori.

Pronto varios países siguieron el ejemplo de Italia; ya en 1919 los primeros pozos geotérmicos de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos de The Geysers, California, USA en 1921 y en Tatio, Chile. Para 1958 entra en operación una pequeña planta en Nueva Zelanda y en 1959 inician operaciones en México en Pathé, Hidalgo.

Un sistema geotérmico es generalmente clasificado por la geología, hidrogeología y por las características de su transferencia de calor de forma convectiva o conductiva, donde los sistemas geotérmicos se encuentran limitados por la actividad tectónica del área o la región con actividad volcánica (figura 15). Son necesarios mayores esfuerzos en investigación y desarrollo como un objetivo primordial, debido a que la producción de reservorios exitosos depende en gran medida del apropiada selección y clasificación de métodos de exploración (Moeck, 2014).

### Capítulo 3. Marco Teórico

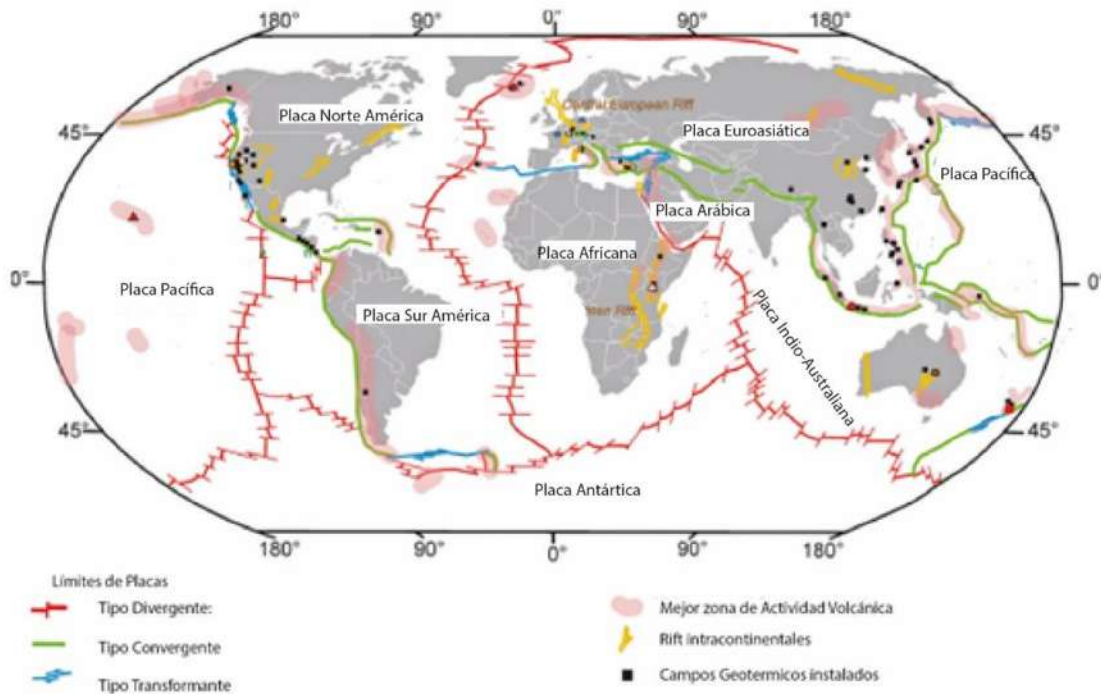


Figura 15. Mapa en donde se muestran los límites de las Placas Tectónicas, también los principales campos geotérmicos, las zonas de volcanismo activo y zonas de Rift (tomado y modificado de Moeck, 2014).

La comprensión de los procesos de actividad tectónica a diferentes escalas puede ser crucial para caracterizar los recursos geotérmicos de alta entalpía de convección dominante, catalogar los escenarios geotérmicos de acuerdo a su configuración tectónica, fuente de calor (magmática/intrusiva/ o no magmática) y controles geológico sobre el mecanismo de transporte térmico, el sistema de almacenamiento y la estructura de permeabilidad (Moeck, 2014).

El tectonismo y vulcanismo activo se encuentra relacionado a los márgenes activos de las placas que representan condiciones favorables para los sistemas geotérmicos de alta entalpía dominados por la convección del manto. Arcos magmáticos en las zonas de subducción en márgenes convergentes (p. e.g. Arco Volcánico Centro Americano), márgenes divergentes oceánicos o intracontinentales, zonas transformantes con placas en deslizamiento y las islas

### **Capítulo 3. Marco Teórico**

oceánicas formadas por magmatismo de los puntos calientes (Hawaii), en donde las zonas de falla pueden actuar como conducto de los fluidos (Moeck, 2014; Negrín, 2014).

En los escenarios geotérmicos dominados por la convección, la circulación de los fluidos calientes asciende a la superficie, regularmente se originan por la infiltración de agua meteórica y también por mezclas parciales de los fluidos magmáticos, se encuentran controlados por actividad de una cámara magmática en áreas volcánicas, en fallas de terrenos extensionales o ambos como cuerpos intrusivos en zonas de fallas.

Los sistemas geotérmicos se pueden dividir en magmáticos los cuales encuentran en regiones divergentes con actividad volcánicas que va de basáltica a andesítica, en márgenes convergentes con plutonismo reciente <10 mil años, enfriándose lentamente de centenas de metros a algunos kilómetros de dimensión, con magmatismo calco-alcalino.

El principal objeto de estudio para la generación de energía eléctrica a lo largo de los arcos de islas es la zona de flujo ascendente de alta temperatura, alimentado por la mezcla de flujos meteóricos y magmáticos, el gradiente de temperatura generalmente aumenta a profundidad y disminuye por debajo del flujo de salida acompañados por depósitos hidrotermales y temperaturas de 40 a 10°C (Williams *et al.*, 2011). Sin embargo, las manifestaciones hidrotermales calientes se encuentran asociadas con alteraciones argílicas (figura 16), las manifestaciones comúnmente constan de una parte dominada por vapor y otra por líquido.

## Capítulo 3. Marco Teórico

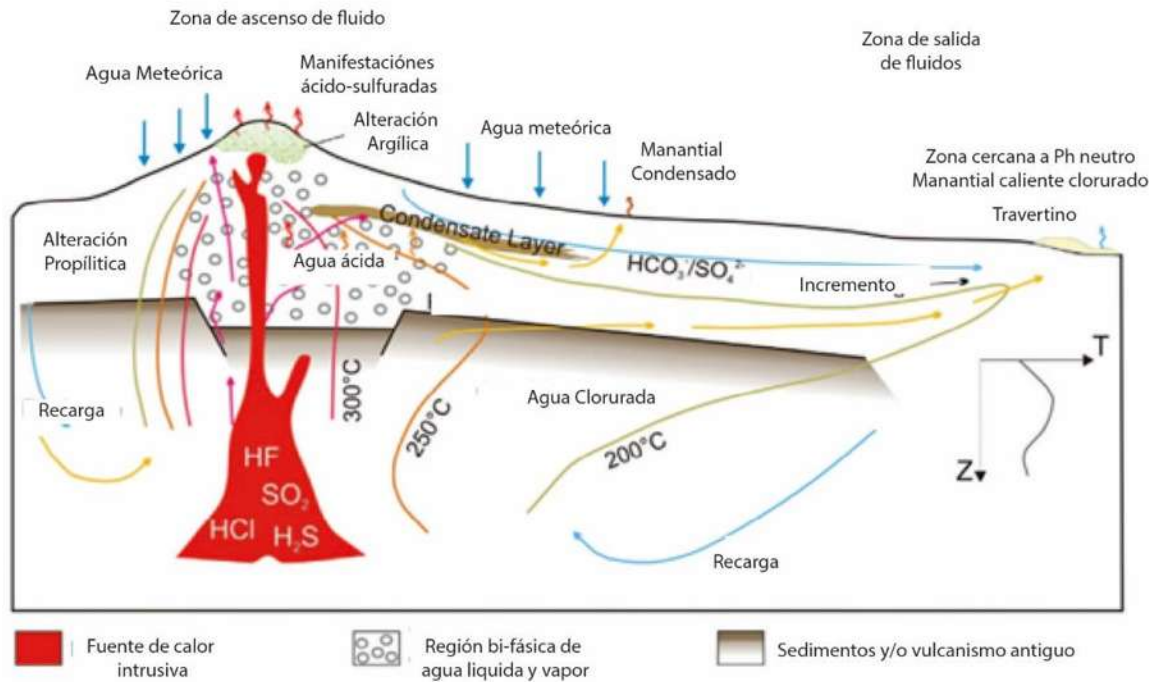


Figura 16. Modelo de escenario geotérmico controlado por actividad volcánica en un arco magmático, en donde se muestran las zonas de interacción entre los fluidos con la fuente magmática, y las zonas de alteración hidrotermal (tomado y modificado de Moeck, 2014).

### 3.2 Geología y escenarios estructurales

Las fracturas presentes en las rocas se forman como el resultado de esfuerzos y de la forma en cómo estos varían en el tiempo (Hatcher, 1995), ellas juegan un papel muy importante en la conducción de los fluidos, hidrocarburos, soluciones mineralizadas y pueden ser asociados a fallas geológicas. Podemos definir a las fallas como discontinuidades en las rocas a lo largo de las cuales existe un desplazamiento significativo generalmente en las partes superiores de la corteza, a lo largo de un plano de falla. Estos planos cortan y desplazan distintas litologías, las fallas expuestas en el afloramiento son más visibles en regiones de relieve topográfico pronunciado, es importante de estos planos expuestos ya que puede contener mucha información acerca de las condiciones de formación de la falla, de su sentido de movimiento y de la orientación de los esfuerzos principales (Babín *et al.*, 2010).

### Capítulo 3. Marco Teórico

Las fallas conjugadas son aquellas contemporáneas que se han formado en condiciones de esfuerzos similares. Disponiendo de formas simétrica en relación con los ejes principales de esfuerzo aplicado ( $\sigma_{max}$ ), la dirección de deslizamiento en cada falla del sistema conjugado, suele ser normal a la línea de intersección de las dos fallas (Babín *et al.*, 2010).

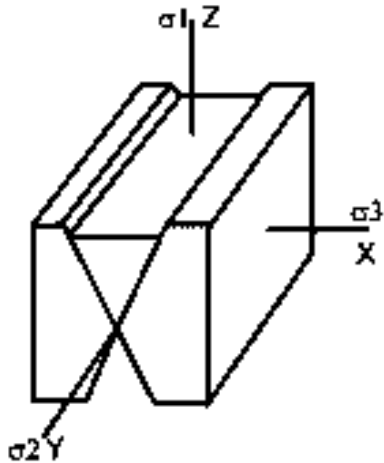


Figura 17. Anderson (1951) reconoció que las propiedades de las direcciones de esfuerzos principales en combinación con la ley de Mohr-Coulomb, requieren que cerca de la superficie de la tierra solo se puedan formar fallas de deslizamiento según la dirección y fallas de deslizamiento según el buzamiento (normales e inversas).

Los medios fracturados presentan propiedades que son susceptibles de medición y por lo tanto son útiles para el proceso de caracterización de los mismos (Moreno-Sánchez *et al.*, 2006). La deformación depende de factores como el tamaño de grano, su disposición (masivo o estratificado), cementación, porosidad y por su contenido mineral (Crider y Peacock, 2004). La manera en que se generan las fracturas es cuando se presenta una pérdida de cohesión interna en la roca, que se pueden dividir en dos tipos de discontinuidades: las fracturas de Tensión (figura 18 A.) y las fracturas por cizallamiento (Figura 18 b. y C.) las cuales se pueden diferenciar por solo la separación de la primera y el movimiento aparente de las segundas.

### Capítulo 3. Marco Teórico

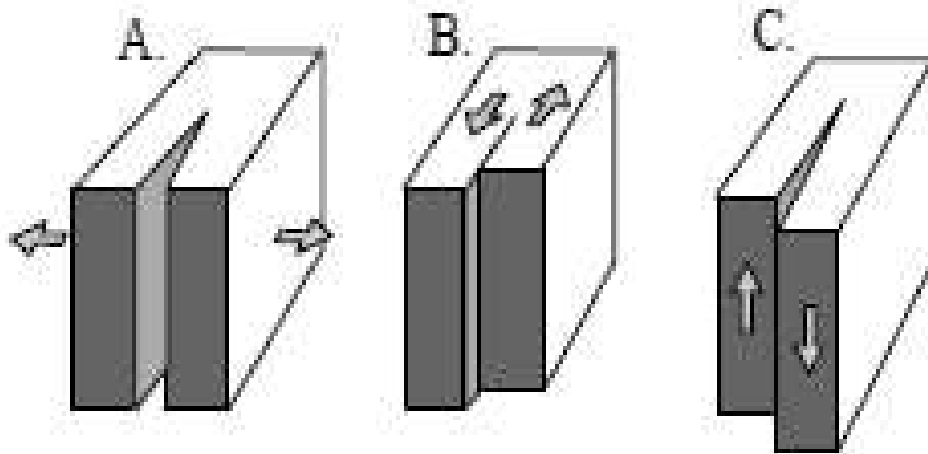


Figura 18. Tipos de fracturas. A: Modo I, fracturas de tensión. B: Modo II, fracturas de cizalla. C: Modo III, fracturas de cizalla (tomado de Twiss y Moores, 1992).

Las fallas son efecto de la deformación, en donde la roca rebasó el límite elástico-plástico, que crecen a partir de la zona de concentración de las fracturas y se extienden hacia sus extremos. El crecimiento de las fallas está dado esencialmente por dos mecanismos, propagación de fracturas que ocurre cuando por el crecimiento de la fractura al avanzar la deformación o en zonas de terminación, y enlaces de fracturas que se da por la unión con otras fracturas o sistemas secundarios de fracturación.

Obtener la dirección y sentido del movimiento de las fallas durante el análisis frágil tectónico es un requisito indispensable para determinar la cinemática de las fallas a diferentes escalas. Algunas de las características de los tensores se analizan a través de las mediciones de las estrías de las fallas (Caray y Brunier, 1974; Angelier, 1975; Etchecopar *et al.*, 1981; Armijo *et al.*, 1982; en Petit, 1987). También es necesario la determinación de la dirección y el sentido con las observaciones directas en la superficie de la falla.

Los marcadores cinemáticos son el desarrollo de una serie de fracturas secundarias cuya orientación y movimiento sobre el sentido de los desplazamientos sobre una falla, las cuales pueden ser de cizalla simple (R, R', así como la P) o extensionales (T), conocido como sistema de Riedel (figura 19). Si R y R' se confunden, la interpretación del sentido de cizalla es incorrecto y contrario. En los medios rocosos naturales existen numerosas fracturas de

### Capítulo 3. Marco Teórico

muy diversos tamaños y también con orientaciones diversas, cuando una fractura se propaga se aproxima a otras fracturas y tendrán un enlace.

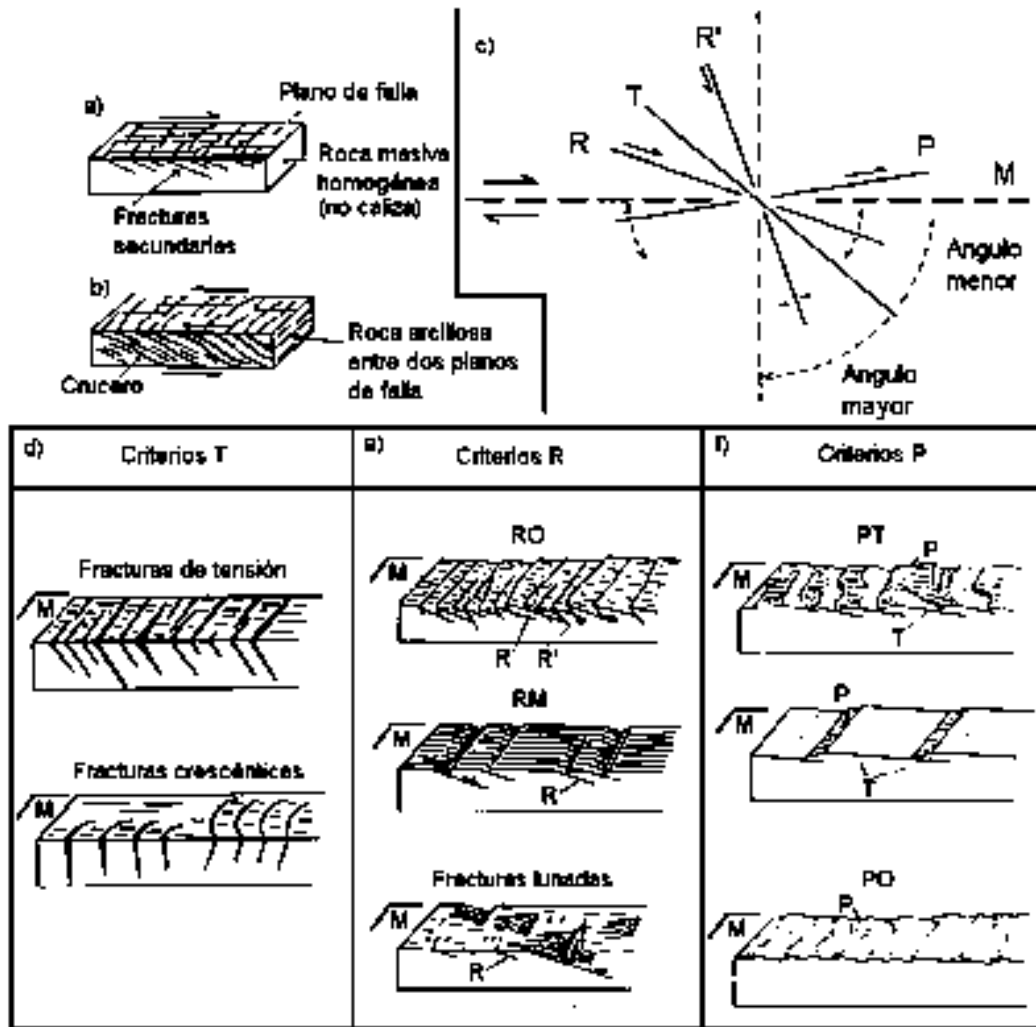


Figura 19. Fracturas secundarias asociadas a fallas con relación al sentido de Cizalla en este caso de tipo derecho. En dónde; R= fracturas Riedel, sintéticas con el sistema de cizalla general, R'= fracturas antitéticas a la cizalla, T= fracturas de Tensión (abiertas), paralelas al esfuerzo máximo, P= Fracturas de cizalla sintéticas con la cizalla general (Petit, 1987).

El flujo de los fluidos a través de las fallas tiene numerosas repercusiones y aplicaciones prácticas, porque las fallas comúnmente afectan en los acuíferos, reservorios y el desarrollo del paso de los flujos (Caine *et al.*, 1996; Aydin, 2000,; Bense *et al.*, 2008; Rtervatnand y Fossen 2011: En Cilona *et al.*, 2015). La permeabilidad de las fracturas depende de la densidad, conectividad y más importante de la conductividad hidráulica de las diferentes



### Capítulo 3. Marco Teórico

fracturas y planos de falla (Barton, *et al.*, 1997 b). En un medio fracturado relativamente pocas fracturas y fallas sirven como conducto para el flujo de los fluidos (Long *et al.*, 1991; Barton *et al.*, 1995).

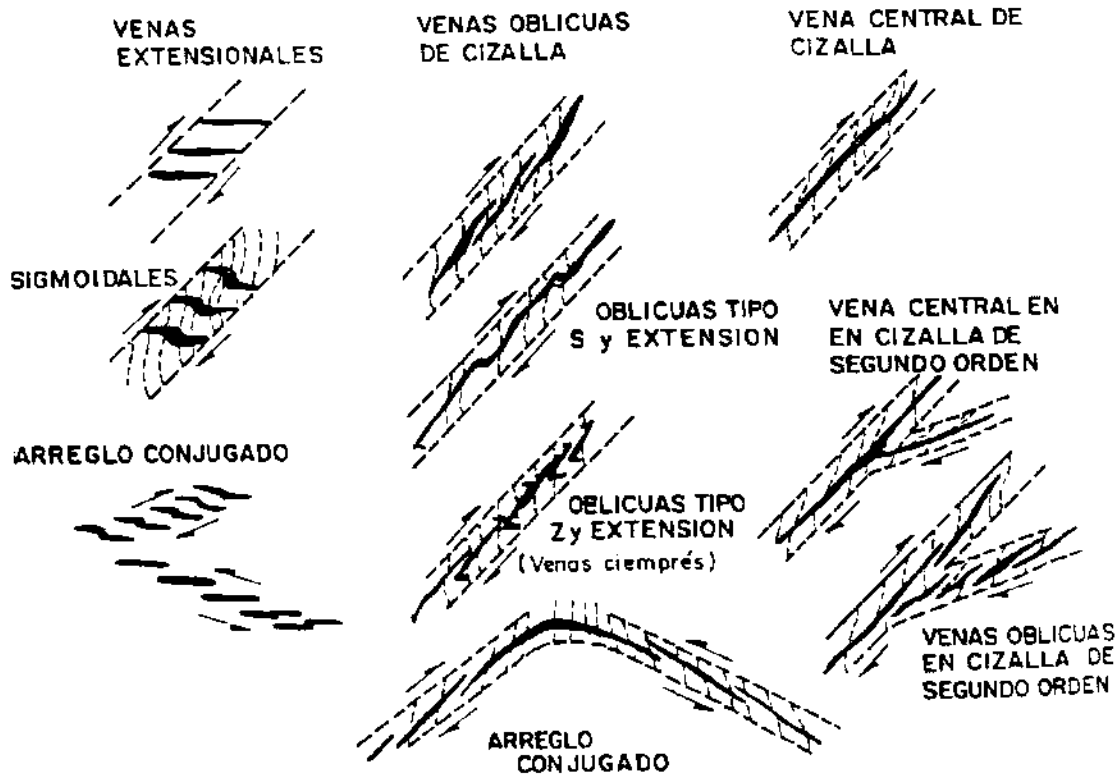


Figura 20. Arreglos de las fracturas rellenas en zonas de cizalla, Tomado de Hodgson, (1989).

Para tener un entendimiento de las fracturas, se toman en cuenta el modelo de las estructuras en vetas de depósitos de oro (figura 20), en donde las fracturas mineralizadas se encuentran dentro o cerca de la zona de cizalla, en largos sistemas de intersección de falla (Hodgson, 1989). En este contexto, las zonas más favorables para el desarrollo de mineralización, pertenecen a zonas extensionales donde los espacios generados circulan fluidos con mayor

### **Capítulo 3. Marco Teórico**

facilidad. La mineralización con génesis hidrotermal rellenan las fracturas y espacios vacíos, los cuales provocan un decrecimiento en la permeabilidad, inhibiendo la circulación de los fluidos (Elders *et al.*, 1979; 1984; Sibson, 1987 en Curewitz y Karson, 1997).

Las propiedades hidráulicas de los fluidos dependen de las fallas y los sistemas de fracturas asociados con las propiedades de las rocas circundantes afectadas. En donde las zonas de fallas tienen una menor permeabilidad con respecto a la roca huésped, y pueden impedir el flujo de los fluidos (Antoneni y Aydin 1994). Por el contrario en litologías densas, las zonas de fallas pueden tener mayor permeabilidad y pueden actuar como conductos de fluidos que enfocan el flujo de fluidos (Faulker *et al.*, 2010; Aydin, 2014). El comportamiento hidráulico puede evolucionar en el tiempo y el espacio durante el desarrollo de fallas de tal manera que las fallas que muestran un comportamiento complejo de barrera de conducto son también comunes (Bredehoeft *et al.*, 1982; Taylos *et al.*, 1999; Flodin *et al.*, 2005; Mitchell y Faulker 2009; En Agosta *et al.*, 2012).

Para resolver problemas en la eficiencia de los yacimientos geotérmicos se necesitan nuevas y mejoradas técnicas en geología, geoquímica y geofísica para encontrar rocas calientes superficiales y favorables en condiciones de estrés cortical en donde no se encuentren manifestaciones superficiales (Faulds *et al.*, 2011). Para una mejor caracterización de los sistemas geotérmicos debemos conocer los diferentes escenarios estructurales nos encontramos (magmático & no magmático; Transtensional & extensional), así como también es importante determinar que falla o en que segmento de la falla se encuentra la mayor actividad geotérmica (Faulds, 2011, 2012). En un esfuerzo por mejorar las características de los controles estructurales en la actividad geotérmica Faulds y equipo estudian los diferentes controles estructurales en Great Basin (USA) en donde analizan aproximadamente 300 sistemas geotérmicos con temperaturas mayores a 150°C. Encontrando que los Step-Over o rampas de relevo, intersección de fallas y las terminaciones de falla normales o tip-line alojan más sistemas geotérmicos (Figura 21 y 22). Los campos geotérmicos se grafican en un diagrama de barras tomando el número de campos geotérmicos como un 100%, siendo los saltos de fallas normales o rampas de relevo un 32% de los sistemas (Faulds *et al.*, 2012), cada uno de los sistemas se encuentra caracterizado por diferentes propiedades en el incremento en la densidad de fracturas y permeabilidad.

### Capítulo 3. Marco Teórico

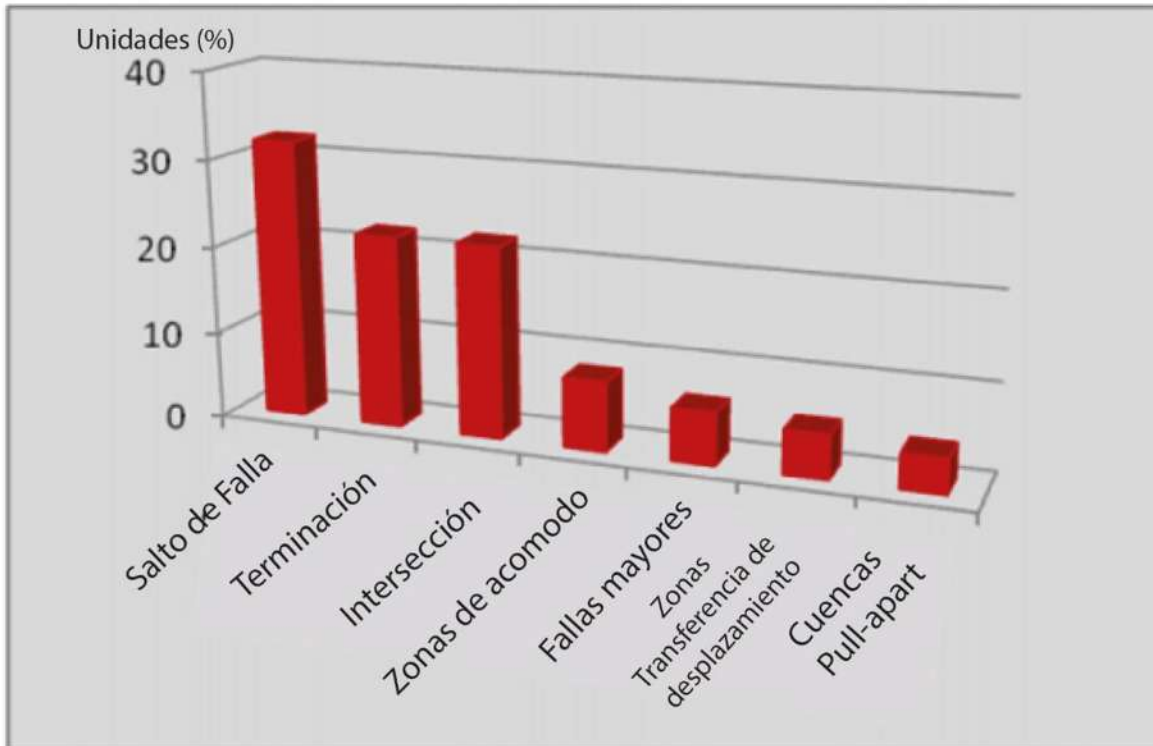


Figura 21. Gráfica en donde el eje (x) son escenarios estructurales y (y) porcentaje de 300 Sistemas Geotérmicos, con mejores escenarios para los saltos de falla ( $\approx 30\%$ ), terminaciones de falla ( $\approx 20\%$ ) y las intersecciones de falla ( $20\%$ ). (Tomado de Faulds, *et al.*, 2012).

Uno punto notable, es que muchos de los sistemas de alta entalpía se encuentran caracterizados por más de un tipo de escenario estructural en la misma localidad, aun así es importante determinar que segmento de la falla es la más favorable para el calor en un yacimiento geotérmico (Faulds, 2012). Las fracturas y fallas que son generadas en una estructura rocosa a través de la historia, consecuentemente algunas no tienen relación con el campo de esfuerzo actual (Seeburger y Zoback, 1982; Segall, 1990; Barton y Zoback, 1992; En Barton *et al.*, 1997 b), sin embargo, el campo de esfuerzos actual puede controlar las estructuras en sus propiedades tal como el flujo de los fluidos. Por lo tanto, para entender el régimen del flujo de los fluidos donde la permeabilidad es dominada por el fracturamiento, es necesario determinar la orientación y su relación con el campo de esfuerzos actual (Barton *et al.*, 1997 b).

### **Capítulo 3. Marco Teórico**

La productividad de los sistemas geotérmicos se encuentra controlada por sistemas de fallas y fracturas en determinados campos de esfuerzo, los cuales se deben ser entendidos a la hora de perforar un pozo de producción. Los yacimientos geotérmicos no suelen hallarse a lo largo de una zona de máximo desplazamiento en las fallas o a la mitad de un segmento mayor, ya que la permeabilidad puede reducirse por el incremento en las arcillas a la hora del desplazamiento, y por la liberación periódica de estrés en los sismos. Sin embargo, las terminaciones de fallas, Step –Overs, intersecciones de falla o zonas de transtensión pull-apart (figura 22) pertenecen a zonas críticamente estresadas largos periodos, en donde los fluidos pueden circular (Faulds *et al.*, 2015).

Estos escenarios forman patrones jerárquicos con respecto a la complejidad de fallas normales mayores y flexiones de falla simple. Las terminaciones de falla son típicamente más complejas que los segmentos medios de la falla, en donde comúnmente se rompen en múltiples segmento en forma de cola de caballo en las terminaciones. Las intersecciones de fallas generan múltiples segmentos de falla y pueden cuadrantes de dilatación discretos. Los Step-Over o Relay ramps consisten la transferencia del desplazamiento entre dos segmentos traslapados (Faulds, *et al.*, 2015).

La evolución de las grandes fallas se debe a mecanismos como 1) una propagación simple o vinculación del segmento de falla más pequeños inicialmente aislado (crecimiento y unión de segmentos, Trudgill and Cartwringth, 1994) o a un crecimiento de fallas aisladas (Walsh *et al.*, 2003) y 2) la rápida expansión de todas las longitudes de la falla y la consiguiente acumulación de desplazamiento sin propagación de la punta significativa (crecimiento coherente de las fallas, Walsh en Fossen, 2013).

Las intersecciones de fallas es reconocida con una eficienciaa alta y conducto importante de fluidos, su importanica en el comportamiento de sismos es donde proporciona la localización de la iniciacion y cese de la ruptura, el estrés concentrado y la generación de sismos, el control de las secuencias sismicas mediante la carga y descarga de tensión en fallas adyacentes proporcionando un punto de debilidad (Talwani, 1999; en Gartrell *et al.*, 2004). En la interacción de fallas existe baja producción de arcillas y se crean zonas subverticales y relativamente abiertas (Ligtenberg, 2005 en Olvera 2017).

### Capítulo 3. Marco Teórico

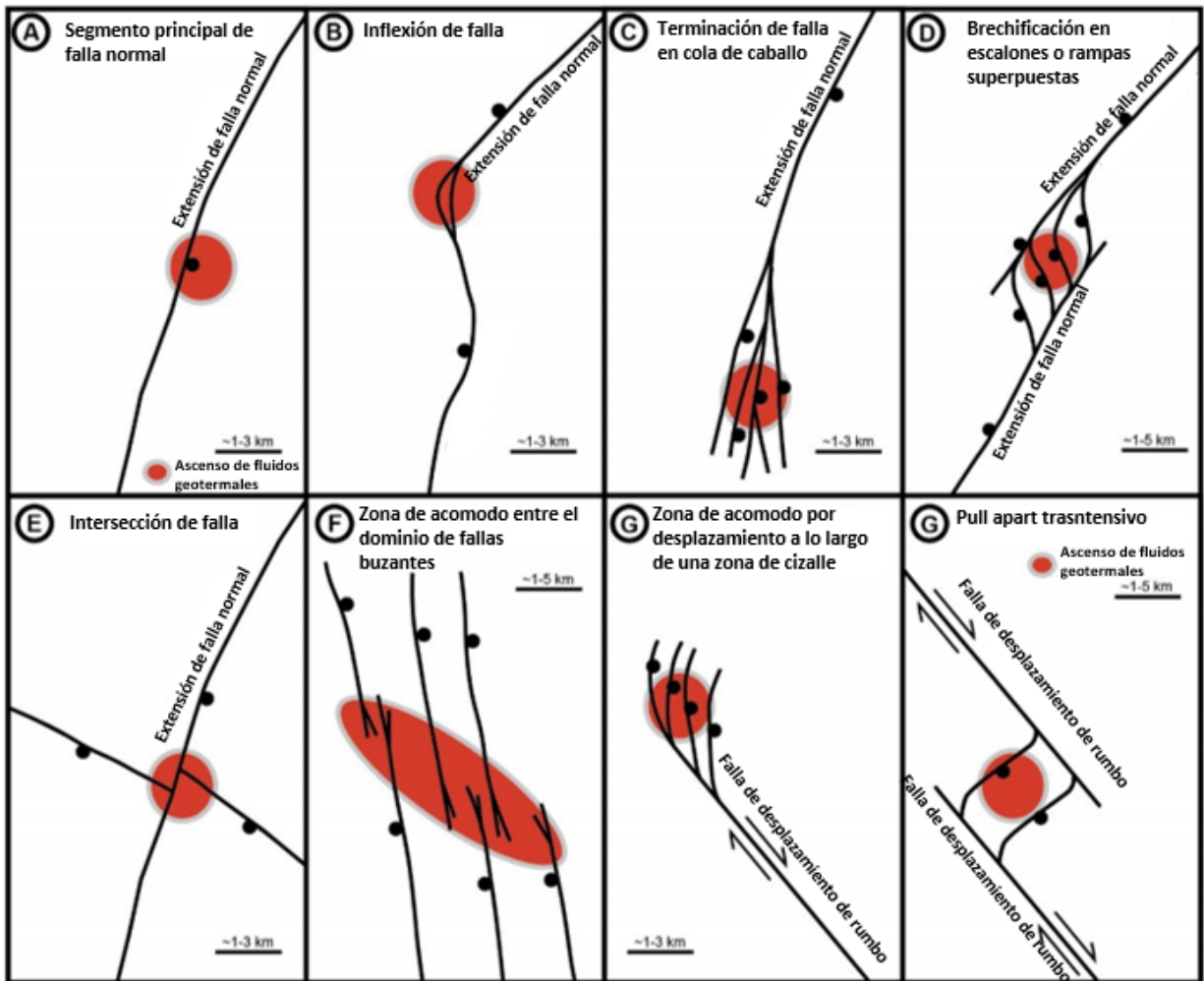


Figura 22. Escenarios estructurales para sistemas geotérmicos donde. **A)** Falla mayor de tipo normal **B)** Curvatura en falla Normal, **C)** Terminación de Falla, **D)** Relevo de falla, **E)** Intersección de Falla, **F)** Zona de alojamiento en fallas normales opuestas, **G)** Cuencas Pull-Apart. (Tomado y modificado de Faulds, *et al.*, 2015).

Modelaciones numericas muestran zonas fuertemente dilatadas en la vecindad de las intersecciones de falla modeladas con pequeña cantidad de deformación masiva (Sanderson y Zhang, 1999; Gartrell *et al.*, 2004) demostrando que las aberturas de fracturas relativamente grandes pueden desarrollarse en las intersecciones en los sistemas fracturados durante la reactivación en donde los fluidos pueden cruzar libremente.

### Capítulo 3. Marco Teórico

La formación de rampas de relevo se generan una vez que dos fallas subparalelas consiguen acercarse lo suficiente para iniciar a interactuar entre ellas (Figura 23). Esto es manifestado por el retardo o detención temporal de la punta de la falla, la curvatura de la punta de falla en la zona de superposición, el desarrollo de una zona compleja de estructuras subsidiarias (fallas, fracturas, bandas de deformación) y la formación de rampas (Peacock and Sanderson, 1991; Nicol *et al.*, 1996 en Fossen *et al.*, 2013). Los campos de esfuerzo y las concentraciones de esfuerzo asociadas con las terminaciones de falla en los dos segmentos de falla interactúan y causan un complejo patrón de deformación (Kattenthon *et al.*, 2000, Rotevatn *et al.*, 2007 en Olvera 2017). La rampa de relevo se convierte en brecha cuando las fallas continúan creciendo (figura 24d), formando una zona fuertemente deformada que vincula a ambas continuando como una sola (Walsh y Wattersn, 1991 en Fossen *et al.*, 2013).

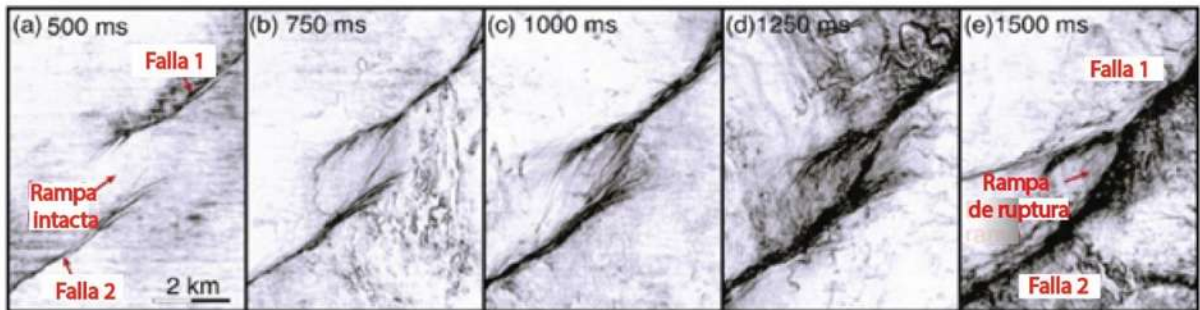


Figura 23. Muestra el modelado de dos fallas formando una rampa de relevo a través del tiempo, Tomado de (Fossen *et al.*, 2013).

Las Rampas de relevo representan un escenario potencial para la migración de los fluidos, la razón es por que incrementan las estructuras como fallas y fracturas, así como una más amplia orientación de fallas (Silbson, 1996; Peacock y Parfitt, 2002; Kim *et al.*, 2004; Fossen *et al.*, 2005 en Fossen *et al.*, 2013).

## **Capítulo 3. Marco Teórico**

### **3.3 Mecanismos Focales**

La microsismicidad natural del terreno, es producida por el paso de las ondas elásticas a través de las rocas de la Tierra. Estas ondas se originan por la liberación repetida de energía en el subsuelo, por alguna intrusión magmática, por el colapso de una estructura geológica (Quijano, 2007). Cuando se tiene suficiente información nos puede ayudar a identificar el mecanismo focal que produjo el sismo e inferir el plano de la falla con base a la distribución de la llegada de las ondas P a la superficie.

Se necesita conocer las propiedades elásticas del medio, ya que el sismograma es el resultado de los focos sísmicos combinados con el efecto de propagación a través del medio elástico (Buforn, 1994), en general los terremotos están asociados a fracturas en la corteza, en los cuales los modelos cinemáticos, el campo de desplazamiento de la fractura está en función de las coordenadas de la fractura y del tiempo sin considerar el estado del esfuerzo (Madariaga en Buforn, 1994).

Los mecanismos focales son una forma de representar los sismos generados por fallas con superficie plana, la cual puede proporcionarnos información importante, como: el tiempo de origen, la ubicación del epicentro, la profundidad focal, el momento sísmico, la magnitud y la orientación espacial de tensor de momento. Los mecanismos focales nos proporcionan la orientación del plano de falla, tipo de falla (transcurrente, normal, inversa o mixta). Estas proyecciones estereográficas muestran dos cuadrantes negros y dos cuadrantes blancos los cuales son separados por un arco de un gran círculo a  $90^\circ$  uno del otro y se intersectan a lo largo del eje N (planos nodales). El rumbo de la falla está indicado por una línea que conecta dos puntos en el diagrama de las pelotas de playa (figura 24).

La interpretación de fallas en imágenes sísmicas es fundamental para la creación de los modelos geológicos en superficie, su uso permite pasar de observaciones singulares geomorfológicas a interpretaciones conceptuales disponibles (Alcalde *et al.*, 2017).

### Capítulo 3. Marco Teórico

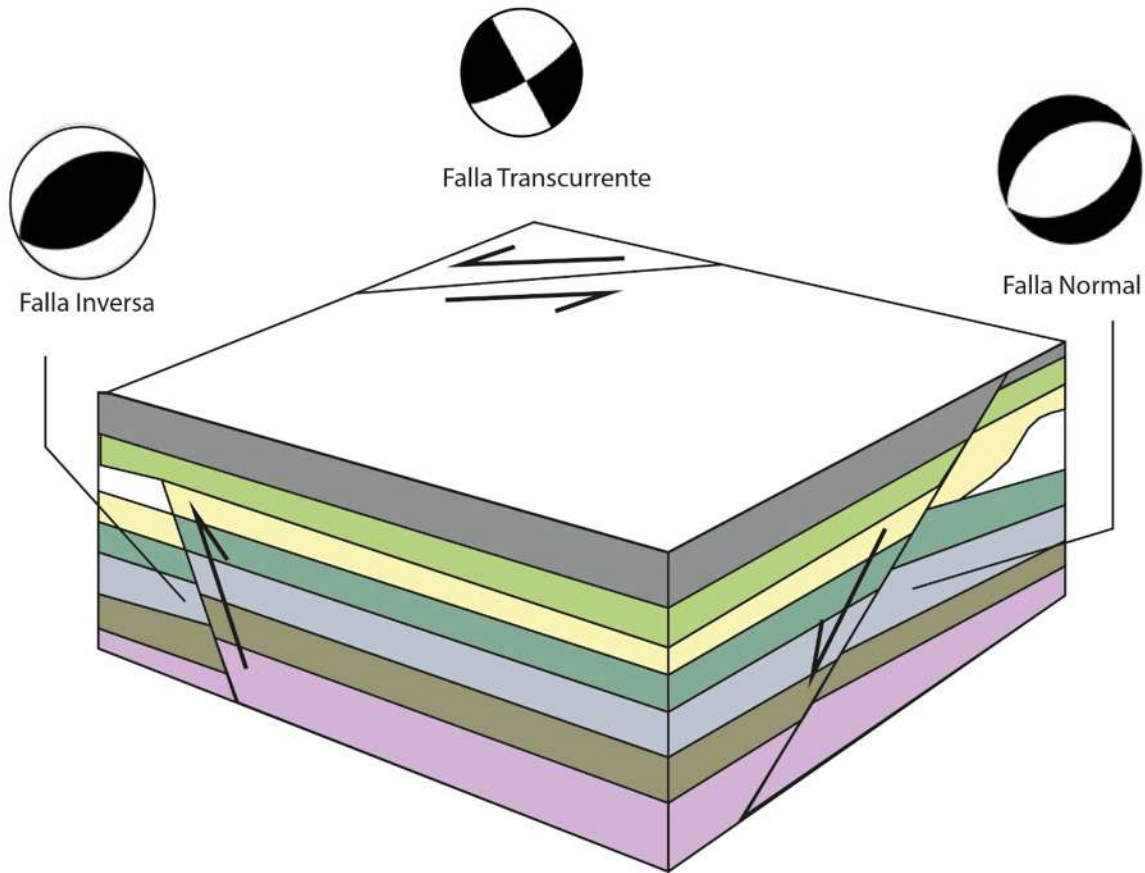


Figura 24. Muestra ejemplos de los mecanismos focales: Fallas normales, fallas inversas y fallas transcurrentes.

Para obtener la solución geométrica de un mecanismo focal es necesario:

- Tener los dos elementos para especificar la orientación del plano de falla.
- Un elemento para la orientación del vector de desplazamiento en este plano.

El método más sencillo para calcular los planos de las fallas a partir de la polaridad de ondas internas está basado en el patrón de la radiación de las ondas **P** para un modelo de foco puntual, en donde el patrón de radiación de la onda **P** es en forma de 4 cuadrantes de signo alternativo separado por dos planos modales, uno de los cuales corresponde al plano de fractura y el otro a un plano auxiliar normal al anterior, de forma que los cuadrantes positivos corresponden a compresiones y los negativos a dilataciones. Para las ondas **S** los planos nodales están a  $45^\circ$  de los anteriores en los ejes de tensión y presión (Buforn, 1994).



## **Capítulo 3. Marco Teórico**

### **3.4 Manifestaciones Hidrotermales**

Los estudios geoquímicos en los acuíferos de las manifestaciones hidrotermales nos permiten conocer el comportamiento físico-químico de las aguas superficiales y subterráneas que interactúan en los yacimientos geotérmicos (Pandarinath) tanto en las condiciones de recarga, así como el grado de conexión con el sistema volcánico-hidrotermal y del posible mezcla de agua (Gonflanti, 1973; Custodio, 1974; Fernandopullé, 1974; Gonflanti, 1974; Gonflanti *et al.*, 1976; Custodio *et al.*, 1987; Gislanson y Eugster, 1987a, 1987b; Custodio, 1988; Gasparini *et al.*, 1990; Veeger, 1991; Scholl *et al.*, 1995, 1996; Capasso *et al.*, 2001; Herrera, 2001; Van der Weijden y Pacheco, 2003; Hildenbrand *et al.*, 2005; Muñoz, 2005; Cruz y Franca, 2006; Asai *et al.*, 2009; Hellwell *et al.*, 2009; Cruz *et al.*, 2010; en Marrero, 2010) .

La composición químico-física de las aguas subterráneas está caracterizada en función de una serie de variables y procesos que afectan al sistema con diferente intensidad y que puede resumirse en: composición inicial del agua de lluvia, clima, relieve, vegetación, características de la roca (composición mineralógica, textura, porosidad y grado de alteración, fracturación y compactación) así como de aportes externos (Custodio y Llamas, 1976; 1983; Drevern, 1997 en Marrero, 2010). Estas condiciones se encuentran regidas por las interacciones de las mismas con el medio ambiente, los cuales originan diferentes agentes geológicos como la disolución de los gases y minerales, precipitación, hidrólisis, hidratación, oxidación-reducción, mezcla de aguas, intercambio iónico, entre otros (Toth, 2000; Fagundo-Castillo, 2007).

Los factores geológicos que controlan la composición química del agua se encuentran: la litología, que determina las facies hidroquímicas dominantes en una región, es decir el tipo de agua, mientras que la tectónica, el fracturamiento, la textura y la porosidad de las rocas ejercen una influencia sobre el contenido de minerales disueltos. Por otro lado, los factores climáticos influyen sobre la dinámica de la meteorización mecánica y química de los macizos, al permitir en primera parte la fragmentación, traslado y acarreo de los minerales de la roca, así como su disolución (Fagundo-Castillo *et al.*, 2007).

### Capítulo 3. Marco Teórico

Sus principales afluentes del estado de Chiapas son el río Grijalva y Usumacinta de que fluyen de Norte a Sur, además de agua meteórica, por lo cual es importante caracterizar y elaborar un modelo conceptual de las aguas subterráneas, superficiales, precipitación y también de las manifestaciones hidrotermales que interactúan en la periferia del CVT.

En el CVT se distinguen tres grupos propios de manantiales termales, Grupo 1) manantiales termales de alta temperatura (44-63°C) con STD >2,760 mg/l (Toquían, Agua Caliente y Orlando), Grupo 2) Manantiales termales de media temperatura (30-45°C) con STD <1,275 mg/l (Agua Tibia, Barillas, Zarco y Zacarías) y grupo 3) manantiales de La Calera con un valor de STD entre 1,227 a 1,872 mg/l con temperaturas bajas (26-29.3°C), todas las aguas presentan valores de PH un poco ácidos de 5.76 a 6.9 medidos en campo por Rouwet, 2006, los grupos 1 y 2 son de tipo SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub> (Figura 25).

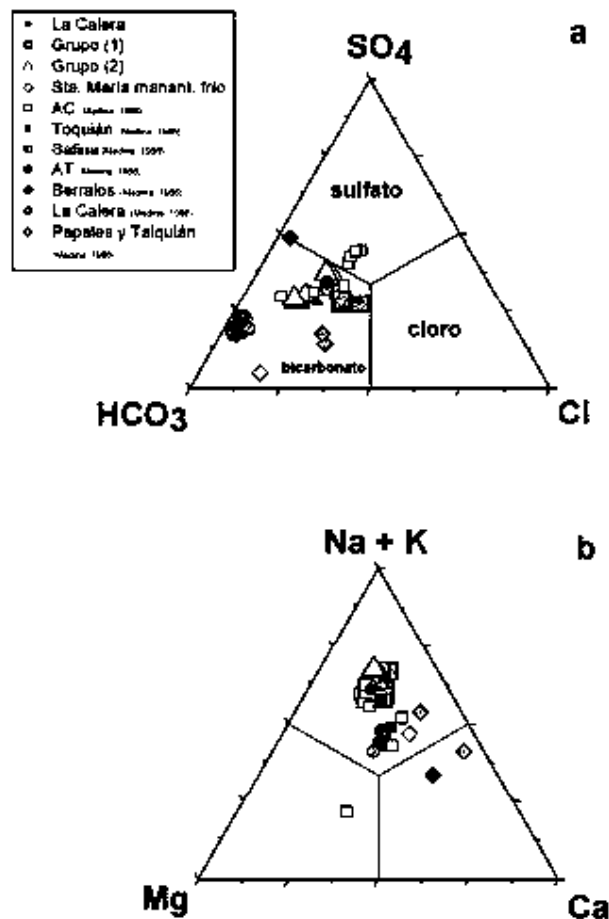


Figura 25. Diagramas hidrogeoquímicos de agua en donde: a) Diagramas ternarios de HCO<sub>3</sub>-Cl-SO<sub>4</sub> y b) Diagrama ternario de Mg-Ca-Na+K, para las muestras de Tacaná. Tomado de (Rouwet, 2006).

### **Capítulo 3. Marco Teórico**

Los isótopos estables (hidrógeno, oxígeno y carbón), proporcionan información físico-química de las aguas en cuanto a origen y mezcla con otros fluidos, basándose en el fraccionamiento que producen los cambios ambientales en relación de diferentes especies isotópicas de varios elementos (Giggenbach, 1992; Mook, 2002, En: Marrero, 2010). Con estos datos podemos identificar, el agua de lluvia, la cota topográfica de la zona de recarga de cada punto de muestreo y las posibles líneas de flujo presenciales (ej, Scholl *et al.*, 1995, 1996; D'Alesandro *et al.*, 2004; Hildenbrand *et al.*, 2005, Demille *et al.*, 2007; Paternóster *et al.*, 2008; Asai *et al.*, 2009; Hellwell *et al.*, 2009; en Marrero, 2010).

## **Capítulo 4. Contexto Geológico**

### **Capítulo 4. CONTEXTO GEOLÓGICO**

El complejo volcánico Tacaná se encuentra en la unión triple de las Placas Tectónicas Norte América, Caribe y Cocos, las cuales se encuentran interaccionando entre sí, las dos primeras por el sistema de Fallas traspresivo Polochic-Motagua lateral izquierdo y al mismo tiempo se encuentran subducidas por la placa de Cocos. El basamento local está conformado por rocas metamórficas Pre-Cámbricas y Paleozoicas. Con varias intrusiones ígneas de composiciones (granodioritas, granitos y dioritas) con edades de 39.5 a 29.1 Ma. y otras de granitos de 13.7 a 20 Ma. (García- Palomo, 2006; Macías *et al.*, 2015), colapsos caldericos de 1 a 2 Ma. Sobreyaciendo a estas unidades se encuentran cuatro aparatos volcánicos orientados NE-SW de composición calco-alcalinios, con depósitos de flujos piroclásticos.

#### **III.1 Marco Tectónico**

La actividad volcánica en el sur de México y América Central se encuentra asociado con el proceso de subducción, en donde participan entidades geológicas como el bloque Maya, Chortis y el Macizo de Chiapas. Sin embargo la variación del volcanismo al sur a la complejidad en los ajustes geodinámicos, en donde los procesos tectónico con la intrusión por parte de la placa oceánica de Cocos, que se encuentran en subducción por dos placas continentales (Norte América y Caribe).

La Geología del estado de Chiapas posible herencia Grenvilliana, ha pasado por diferentes eventos tectónicos como la Orogenia Panafricana y la Orogenia Ouachita, hasta la Orogenia Laramide y Chiapaneca y finalmente expuesto a los eventos actuales con la placa de Cocos. Sin embargo, muchas complicaciones surgen con el hecho de que tres placas tectónicas se involucran y donde la deformación no se distribuye sobre el borde de la región o sobre el límite de la mayor placa que lo afecta. Sin embargo, el límite entre las placas tectónicas de Caribe y Norte América representa una zona de deformación, levantamiento, manifestaciones dispersas de magmatismo incluyendo al Volcán de Tacaná el cual pertenece al AVCA.

Los eventos tectónicos en fases de compresión, plegamiento y metamorfismo correspondientes a un post-deposito tipo *flysh* del Campaniano- Maestriciano indican una dirección general NE-SW, con metamorfismos generalmente débil, con algunos intrusivos sintectónicos que participaron en la deformación. La región fue comprimida nuevamente

## **Capítulo 4. Contexto Geológico**

después de los depósitos tipo *flysh* del Cretácico Superior, que dio origen a pliegues oblicuos y cizallamientos correspondiente a las fases Laramidicas, en donde se llevó acabo en dos etapas: la primera correspondiente a una compresión N-S o NNE-SSE que genero pliegues inclinados hacia el norte, y la segunda con una compresión NE-SW y dio lugar a pliegues inclinados hacia el noreste (Carfantan, 1981).

Para el Mioceno Tardío se presenta una compresión que dio origen a pliegues orientados NW-SE probablemente contemporánea con la fase mayor Chiapaneca, finalmente las fallas verticales principales pueden ser agrupadas en tres familias de dirección media N105° y N25°, estas dos direcciones son sensiblemente paralelas a la dirección del sistema de fallas Polochic-Motagua (Carfantan, 1976, 1981). El sistema de familias N105 y N70° son de desplazamiento lateral izquierdo mientras que el sistema N25° se comporta de manera derecha (Carfantan, 1981).

El magmatismo reciente en el sur de México y norte de Guatemala, se encuentra en una zona compleja de controlada por las placas Cocos, Norte América y Caribe, donde la deformación interna es debido a las placas continentales (Garduño-Monroy *et al.*, 2015). Los ajustes de la triple unión desencadenan distintos patrones de fallamiento, sismicidad y actividad volcánica sobre un área que se extiende desde el Istmo de Tehuantepec en México hasta el centro de Honduras (Guzmán-Speziale *et al.*, 1989, Authemayou *et al.*, 2011).

El ángulo de subducción de la placa, el segmento de extensión en Tehuantepec, el movimiento del bloque Chortis con relación a la placa de Norte América, y la deformación intraplaca, son los factores principales que controlan la distribución de la subducción relativa del magmatismo entre el centro de México y el Arco Volcánico de Centro América (Garduño-Monroy *et al.*, 2015).

El límite entre las placa de Norte américa y Caribe se encuentra marcado por el sistema de fallas transpresivo Polochic-Motagua (Figura 26) y una extensión de la cuenca Cayman (Burkart, 1983; Guzmán-Speziale, 2001; Authemayou *et al.*, 20011). Este sistema de fallas se extiende aproximadamente a 400 km de la Costa de Chiapas al oeste del mar Caribe. La correlación del desplazamiento de las rocas, pliegues, red hídrica, al norte y sur del sistema

## Capítulo 4. Contexto Geológico

de Fallas Polochic-Motagua, sugieren un movimiento izquierdo a los 132 $\pm$ 5 Km a lo largo de la falla Polochic durante el Neógeno (Burkart, 1983; Garduño-Monroy *et al.*, 2015).

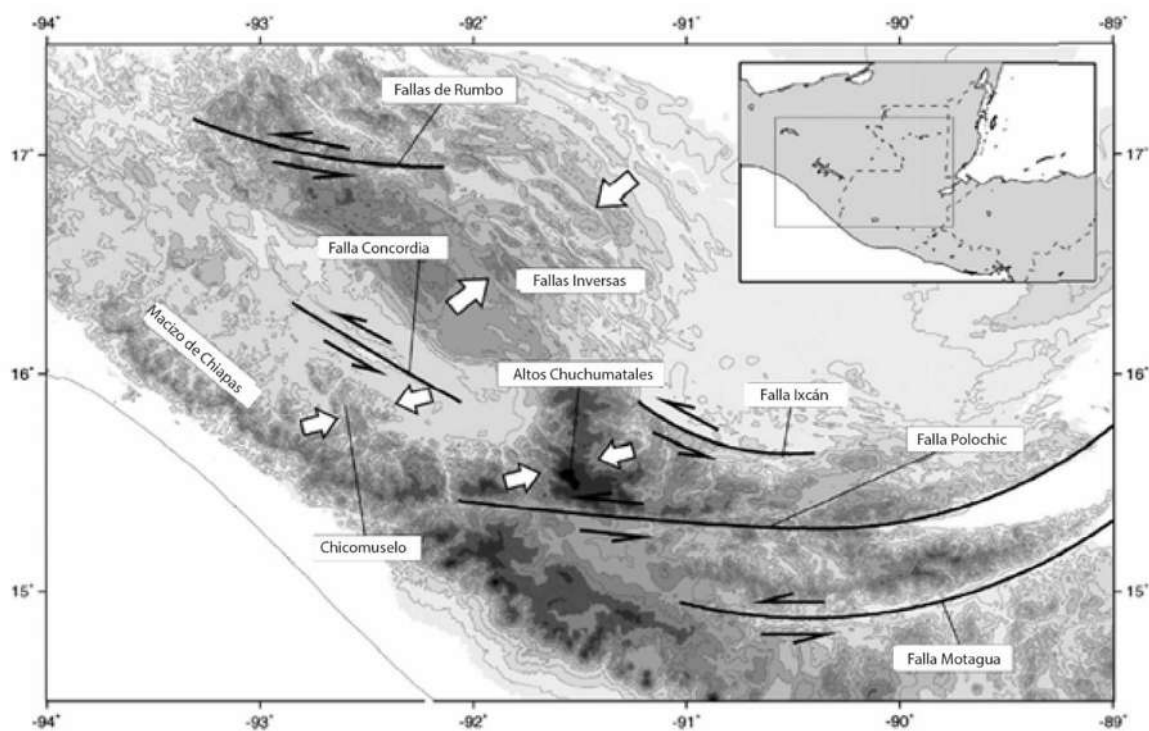


Figura 26. Mapa tectónico donde se pueden ver los principales Sistemas de fallas al sur de México, en donde se resaltan las fallas Polochic, Motagua y el macizo de Chiapas. Tomado de (Guzmán-Speziale, 2010).

El movimiento relativo entre la placa de Norte América y Cocos, a lo largo del sistema de fallas Polochic-Motagua es de 18-22 mm/año en el este de Guatemala, 14-20 mm/año en el Centro de Guatemala y es insignificante en el borde de México-Guatemala (Lyon-Caen *et al.*, 2006; Franco *et al.*, 2012; en Garduño-Monroy *et al.*, 2015). De acuerdo con Franco *et al.*, (2012) el sur de la falla Motagua tienen un movimiento de  $\approx$ 9 mm/año representado por una extensión este-oeste el cual genera el Graben Honduras N-S.

En Chiapas el movimiento relativo entre Norte América y Caribe se encuentra representado por un sistema WNW de fallas lateral izquierdo (Guzmán-Speziale y Mecenes-Rocha, 2000) que fueron activadas en el Mioceno Medio. Este control de fallas es donde se localiza la actividad volcánica en el estado de Chiapas. Algunos autores proponen que la falla Polochic se encuentra conectada al oeste con otra importante estructura (falla Tonalá) con dirección WNW (Figura 27), esta estructura es paralela a la trinchera de América Central y al Macizo

## Capítulo 4. Contexto Geológico

de Chiapas (Carfantan, 1976; Pindell *et al.*, 2005; Wawrzyniec *et al.*, 2005; Ratschbacher *et al.*, 2009; Autemayou *et al.*, 2011; Fraco *et al.*, 2012. En Garduño *et al.*, 2015).

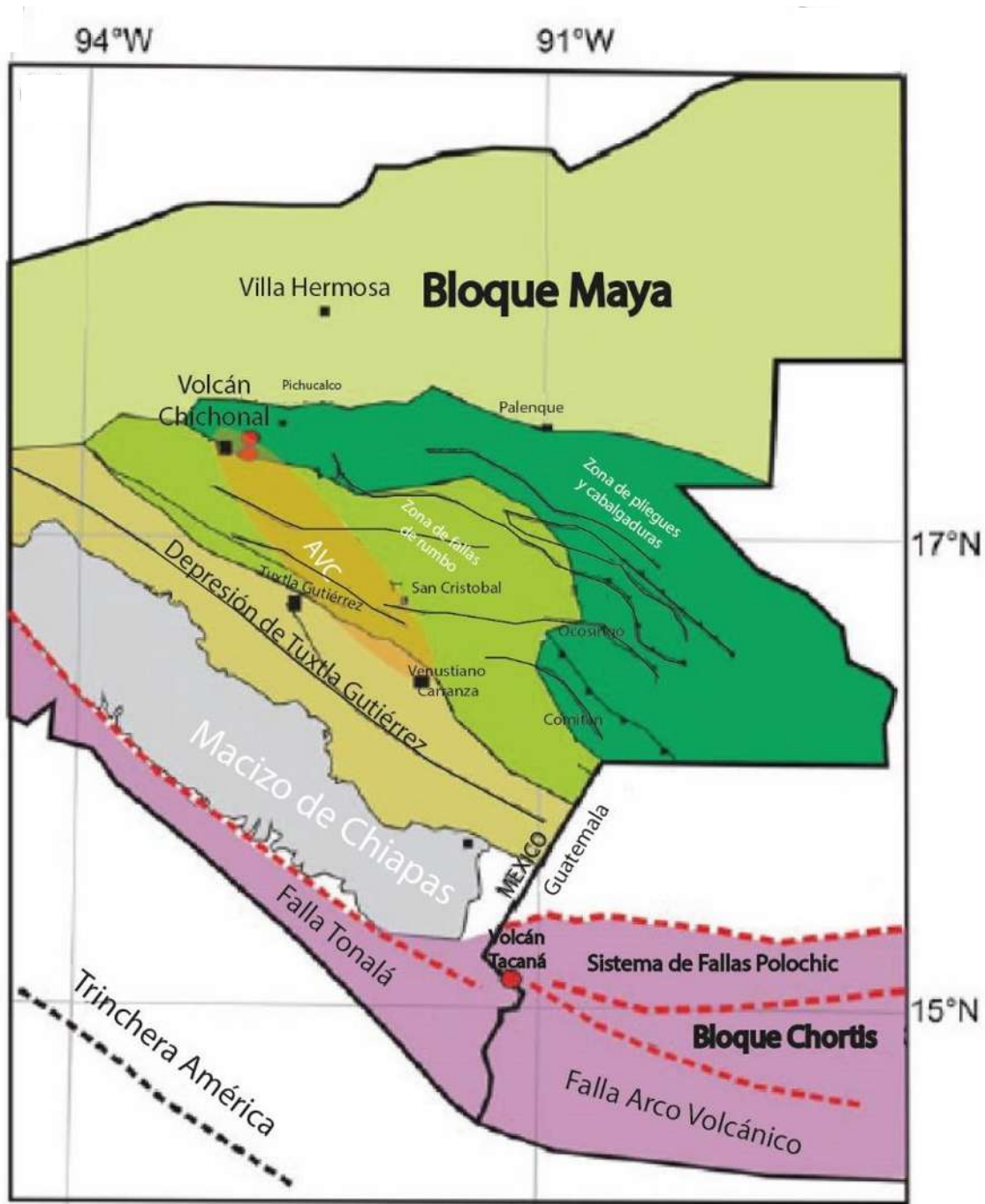


Figura 27. Principales características geológicas regionales al sur de México y Guatemala, donde se muestra la ubicación del Arco Volcánico Chiapaneco, la el bloque Maya, la región de pliegues y cabalgaduras, el Macizo de Chiapas. Tomada de Garduño-Monroy *et al.*, (2015).

## **Capítulo 4. Contexto Geológico**

### **4.2 Marco Geológico**

El bloque Chórtis marca el límite entre la Placa Caribe y la de Norte América, su basamento está conformado por rocas granitoides y ortogneises (Weber *et al.*, 2007) que oscilan en edades de Precámbrico (?) al Paleozoico, conocido como el Grupo Las Ovejas (Schuartz, 1979). La cobertura litológica de este terreno se encuentra representada por secuencias mesozoicas sedimentarias del Triásico al Jurásico y Cretácico Superior, que llevan por nombres la formación Todos Santos, Mogoñé, San Ricardo, Chinameca, Grupo Sierra Madre, Ocozocuautila, Juan Crispín y Méndez, las cuales plasman morfologías altos montañosos muy abruptas con anticlinorios y sinclinorios cuyos ejes se encuentran alineados al NW (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1992) y limitados los depósitos por la estructura regional lateral izquierda Polochic (figura 28 y 29).

Descansando estratigráficamente sobre los paquetes sedimentarios se encuentran las rocas del Cenozoico desde el Plioceno hasta el Holoceno, que están constituidas por depósitos de limos arcillas y depósitos piroclásticos derivados de la actividad volcánica del AVCA, así como por materiales aluviales y suelos residuales (figura 28 y 29).



## Capítulo 4. Contexto Geológico

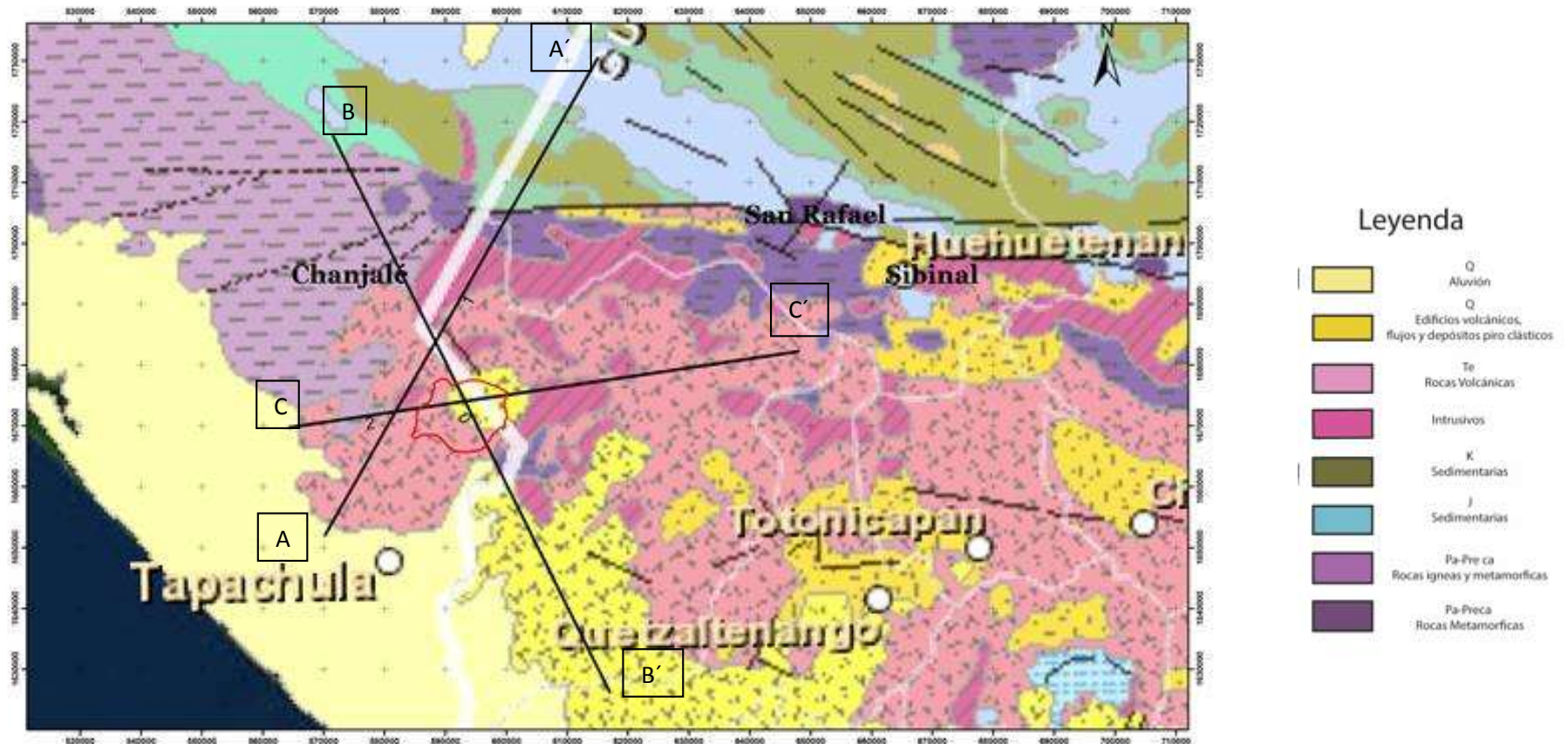


Figura 28. Mapa geológico regional del sur de México y Guatemala con unidades desde el Precámbrico de color morado hasta el reciente. Tomado de USGS, 2015

## Capítulo 4. Contexto Geológico

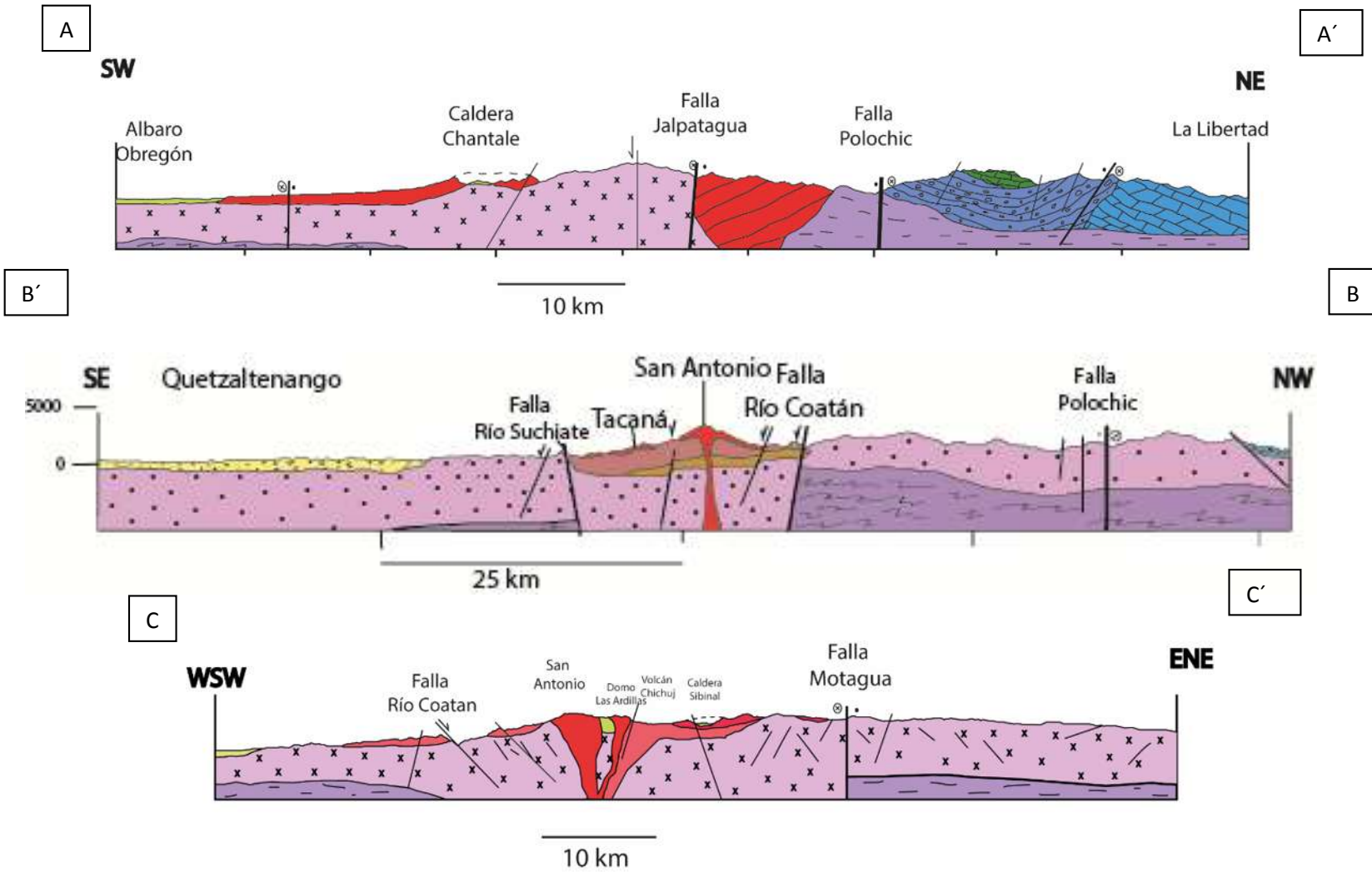


Figura 29. Secciones Geológicas regionales en donde se muestran los contactos entre las diferentes litologías y su arreglo con respecto a las principales fallas.

## **Capítulo 5. Resultados**

### **5. Resultados**

#### **5.1 Tectónica**

Los primeros estudios realizados en la zona son de tipo regional, analizando las estructuras mayores, así como el fracturamiento que se genera a travez de estos esfuerzos. Con la ayuda de MDE recolectados en la página de INEGI, se trazaron las principales evidencias morfológicas al sur de México y Guatemala, y separando por zonas para analizar las direcciones preferenciales de las fracturas y fallamiento en las roquetas de direcciones (Figura 30).

Uno de los principales razgos morfológicos se encuentra paralelo a la subducción, con dirección NW-SE, se pueden observar la cadena de volcanes iniciando al NW con un triangulo rojo al CVT, y siguiendo paralelo a la subducción hacia el SE que pertenecen al AVCA, en lagunos casos muy visibles sus productos volcánicos, como coladas de lava y depositos piroclasticos entre otros, contorneados con lineas rojas (Figura 30).

Las lineaciones mayores corresponden a fallas regionales importantes para el fracturamiento menor, la interaccion entre tres placas tectónicas han forjado evidencias estructurales y litológicos importantes las cuales debemos entender para poder explicar cinematica presente. Considerando el centro del área analizada se encuentra el sistema de fallas transpresivo izquierdo Polochic-Motagua en donde podemos observar la principal tendencia E-W, al norte y noroeste se encuentran dos estructuras una circular con movimiento lateral izquierdo (falla Ixcán), y con movimiento similar la falla Concordia que son afectadas por la dinamica de la falla Polochic. Por otro lado, al S-SE de la zona se encuentran interactuando la falla Motagua (lateral izquierdo), seguida de la falla Jalpatagua con dinamica lateral derecha, que son paralelas a la zona de subducción (figura 30).

En la porción sur se encuentra delimitado un bloque de color amarillo perteneciente al bloque de Chortis, el cual se delimita entre las fallas de cizalla Motagua al Norte y Jalpatagua al Sur con componentes Izquierdo y Derecho respectivamente. Se muestra la tendencia del dezplazamiento con lineas azules de su movimiento hacia el SE del bloque de Chortis, el

## Capítulo 5. Resultados

cual genera una extensión y debilidad en algunos sectores, tal es el caso de el Lago de Atitlán, Guatemala, en donde son notables las estructuras de fallas normales y mas localmente el Graben de Tacaná delimitado por fallas normales con rumbo NE con una compresión NE-SW y extensión NW-SE, generando una zona de compresión hacia el CVT (Figura 30).

Con respecto a las lineaciones, se pueden observar las agrupaciones de los fracturamientos por rectangulos de color negro, y graficados en diagramas circulares de tendencia, al norte de la falla Polochic y Oeste de la falla Ixcán los lineamientos tienen una tendencia principal NW, con una leve rotación horaria hacia el W y una terminación en cola de caballo, por otro lado las tendencias principales para el volcán de Tacaná se notan tres tendencias, una NE-SW, NW-SE y una menor N-S (figura 30).

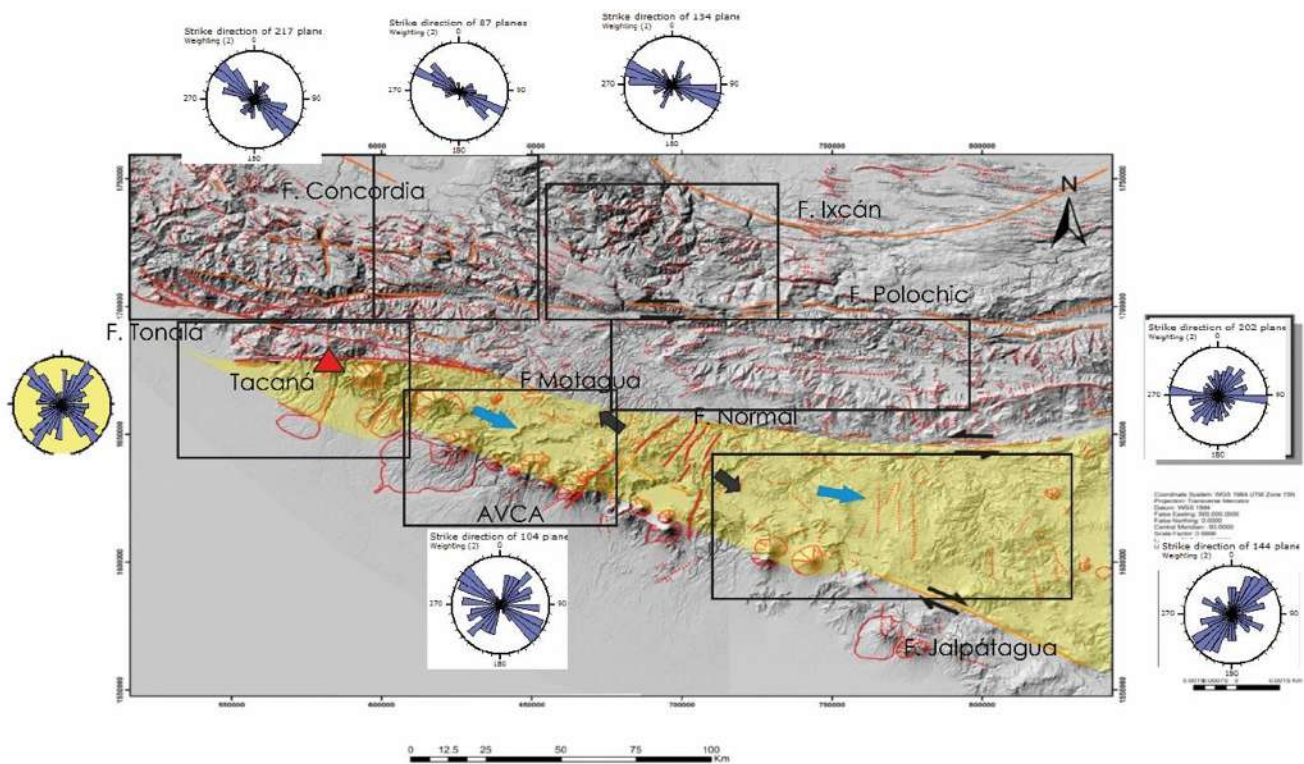


Figura 30. Arreglo tectónico regional al SE de México, con líneas rojas las lineaciones de fracturas y anaranjadas las fallas regionales. Así también, en color amarillo se delimita un bloque interpretado su movimiento con líneas azules y negras. Y por último, el AVCA con alineamiento de volcanes con dirección NW-SE. Las rosetas de tendencia son generadas con los rumbos de las estructuras, agrupandolas en poligonos para su mejor interpretación.

## **Capítulo 5. Resultados**

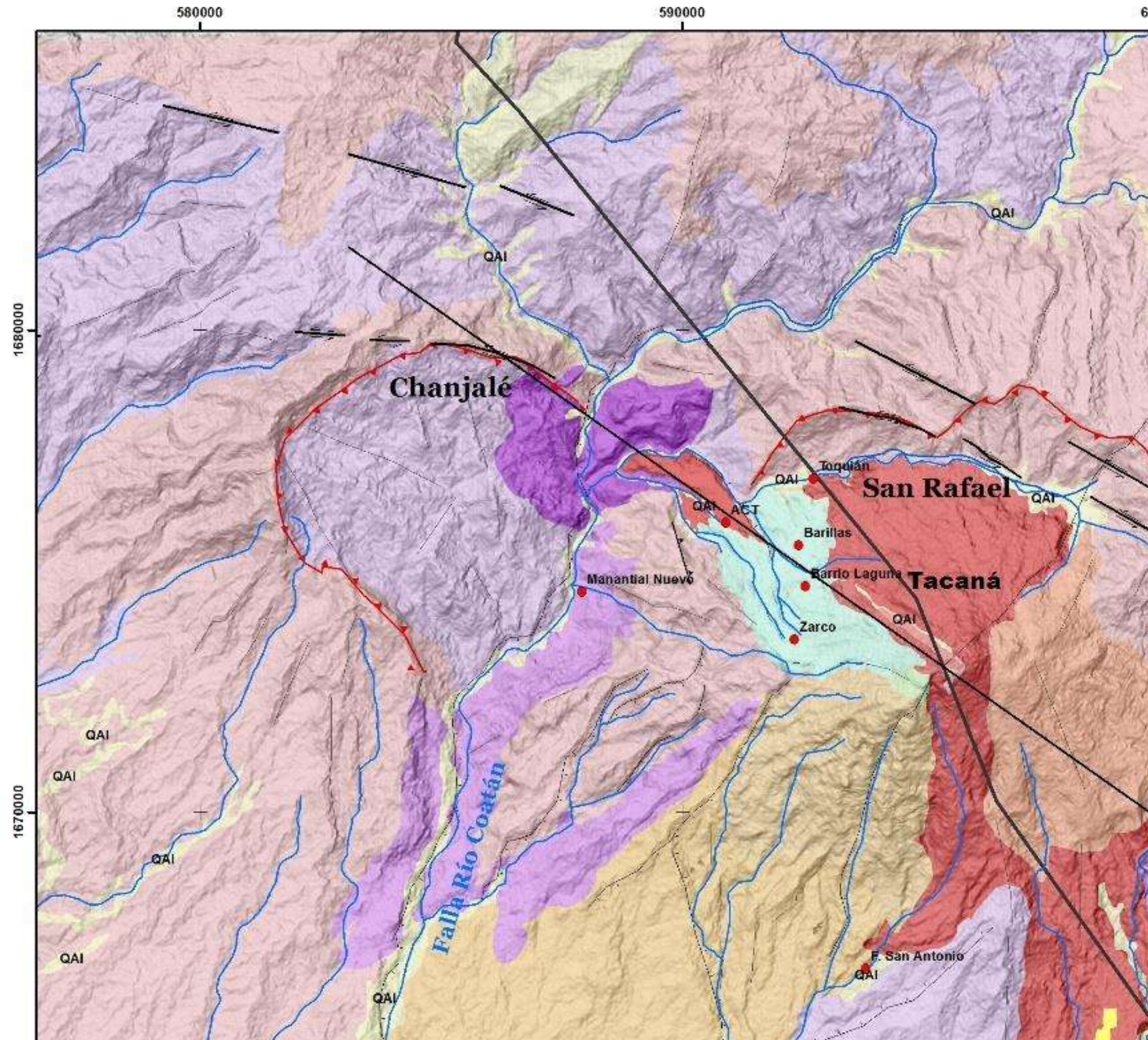
### **5.2 Geología Local**

El trabajo geológico se inicia con la recolección de los diferentes estudios de tipo morfológico y litológicos, los cuales fueron necesarios analizar para la creación y correlación de polígonos en un mapa preliminar, posteriormente en una campaña de campo se realizaron la descripción litológica de los diferentes afloramientos en los alrededores del volcán Tacaná en muestra de mano, para conocer las diferencias mineralógicas entre las unidades, se construyen una sección geológica con orientación NW-SE en donde se representan contactos y estructuras importantes (figura 33), finalmente se recolectaron algunas muestras para su posterior estudio en laboratorio.

La geología en el área se encuentra constituida por una serie de rocas metamórficas las cuales tienen una edad de metamorfismo en el Cretácico Temprano  $142 \pm 5$  Ma (gneises silicificados y rocas metamórficas de bajo grado), seguido de una serie de al menos tres eventos de granitos, granodioritas y Tonalitas (45.79 a 29.1 Ma., 21.56 a 18.76 Ma. y 15.06 a 12.2 Ma.), por último, para las rocas plutónicas tenemos una serie de diques dioríticos cortando a los granitoides. Sobreyaciendo a los granitos se encuentran una secuencia de calderas con edades de 2 a 0.8 Ma. Sobre la cual se formaron una serie de aparatos volcánicos del Pleistoceno-Holoceno alineados SW-NE de composición calco-alcalinos (Secuencia Chichuj, secuencia Tacaná, Domo las Ardillas, y secuencia San Antonio) (Figura 31 y figura 32).



## Capítulo 5. Resultados





## Capítulo 5. Resultados

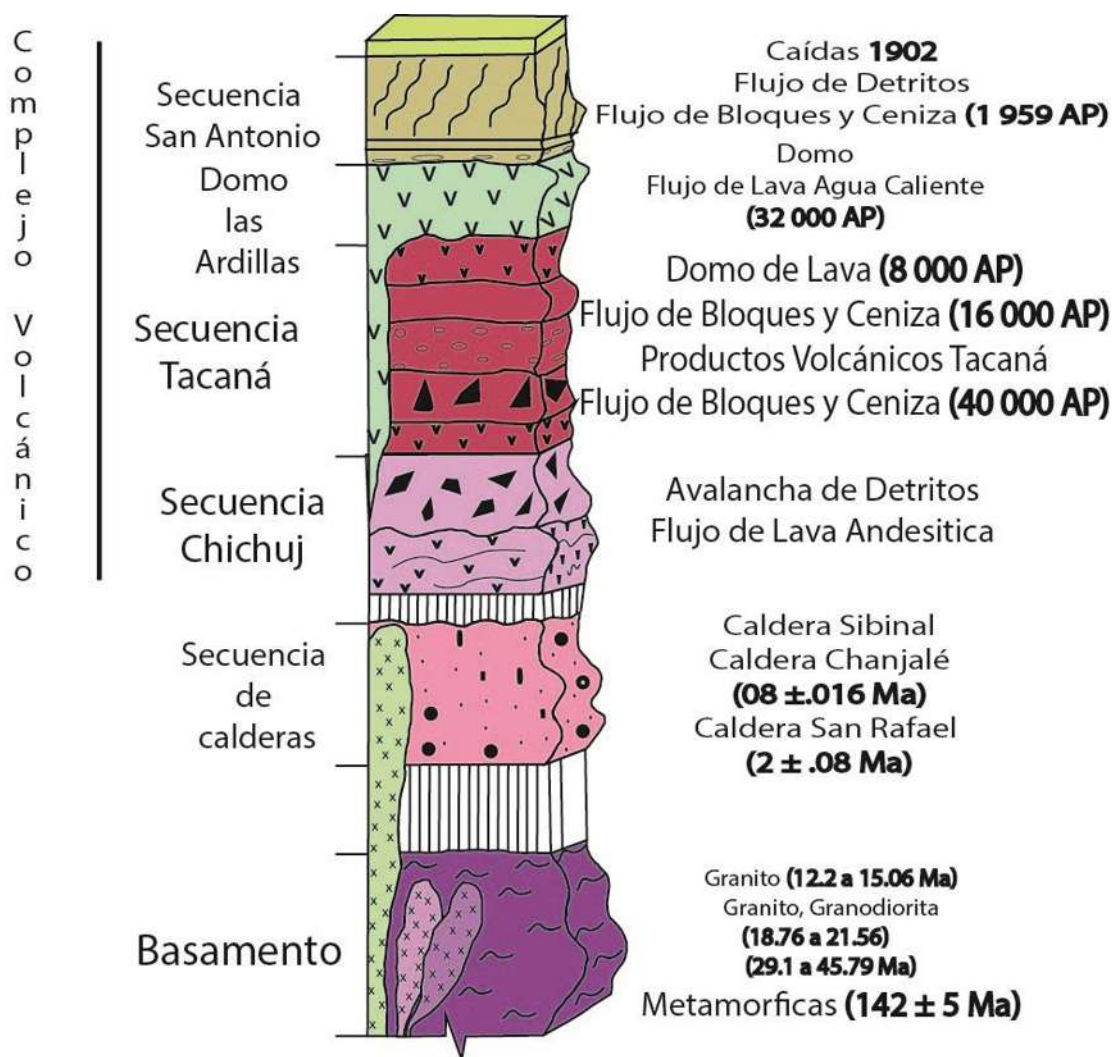


Figura 32. Columna estratigrafía del área de estudio.

**Nota.** La escala de la figura es solo esquemática, no representa los espesores reales de las unidades.

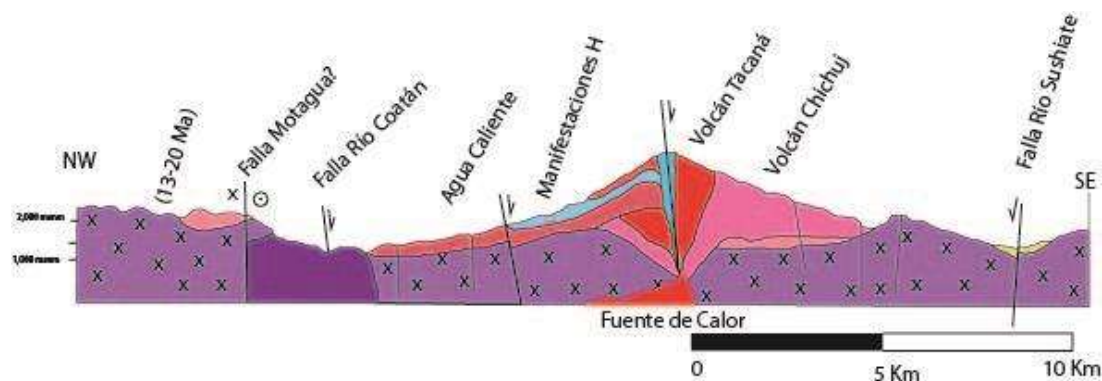


Figura 33. Secciones Geológicas en donde con dirección NW-SE en donde se muestra la disposición de las diferentes litologías y las fallas normales

## **Capítulo 5. Resultados**

Las rocas metamórficas del basamento en el área de estudio afloran en una porción pequeña con al menos una edad de deformación en el Cretácico Temprano (edades de  $142 \pm 5$  Ma.), en comparación de las intrusivas que se presentan en mayor proporción. En la parte NW y SE del CVT, las diferenciar en al menos en dos rocas: la primera presenta metamorfismo débil, posiblemente producto del emplazamiento de intrusivos, en donde los afloramientos se encuentran fracturados intensamente, en algunas ocasiones se encuentran rellenas, con oxidaciones de anaranjado intenso a claro, la roca sana se distingue por coloraciones verde clara para las menos, se pueden distinguir sulfuros de hierro diseminados y escasos carbonatos de cobre (azurita, malaquita) Figura 34 A). Las segundas rocas pertenecen a rocas de tipo gneis, en donde los afloramientos presentan fracturamiento menor, rocas de color verde oxidaciones entre las fracturas anaranjado, foliación penetrativa con plagioclasas alteradas a epidota y donde las rocas presentan una alteración silícica [figura 34 B), y C].



## Capítulo 5. Resultados



Figura 34. Muestra afloramientos de las rocas metamórficas al norte del poblado de Chespal Viejo en donde: A) muestra roca de fuertemente fracturada color verde y alteraciones de oxidaciones, piratas, azurita y malaquita, B) muestra afloramiento de Gneises de color verde fracturamiento medio y fracturas oxidadas de color rojo oscuro, y C) rocas gneises de color verde con minerales alineados, alteración de las plagioclasas a epidotas y silicificación.

## **Capítulo 5. Resultados**

Las rocas ubicadas al noreste del área de estudio cerca del poblado de Sibinal, Guatemala (Figura 35), se encuentran rocas con textura porfídica de color blanco a rosa clara, los afloramientos presentan fracturamiento extremo, con ausencia o pocas oxidaciones, las rocas en muestra de mano presenta minerales equigranulares, con mesostasis escasa de color blanco, la mineralogía principal es fenocristales de Feldespato potásico, Cuarzos, Plagioclasas, menos horblenda y algunos diseminados de pirita y epidota en fracturas.



Figura 35. Afloramiento de granitos cerca del poblado de Sibinal, Guatemala. Los afloramientos se encuentran fuertemente fracturados, y fallados. Las rocas en muestra de mano se encuentran poco alteradas, tonalidades blancas y rosas, cristales de cuarzos, la mineralogía principal es de Feldespato potásico, cuarzo, plagioclasa, con minerales de alteración epidota y piritas diseminadas.

Las rocas granodioríticas son de gran importancia, debido a que estas ocupan la mayor extensión en las rocas del basamento, estas se representadas por rocas con diferencias texturales, y mineralógicas, para la parte NW del área sobre las faldas del río Coatán, en donde los afloramientos se encuentran con fracturamiento intenso, las rocas presentan texturas porfídicas de con mesostasis de color claro (cuarzos y plagioclasas) con minerales de color verde como horblenda. Las estructuras se pueden apreciar fracturamiento y



## Capítulo 5. Resultados

fallamiento de medio a alto, del W al NW los afloramientos se muestran con alteración de óxidos entre las fracturas y rocas en ocasiones poco consolidadas por meteorización (Figura 36).

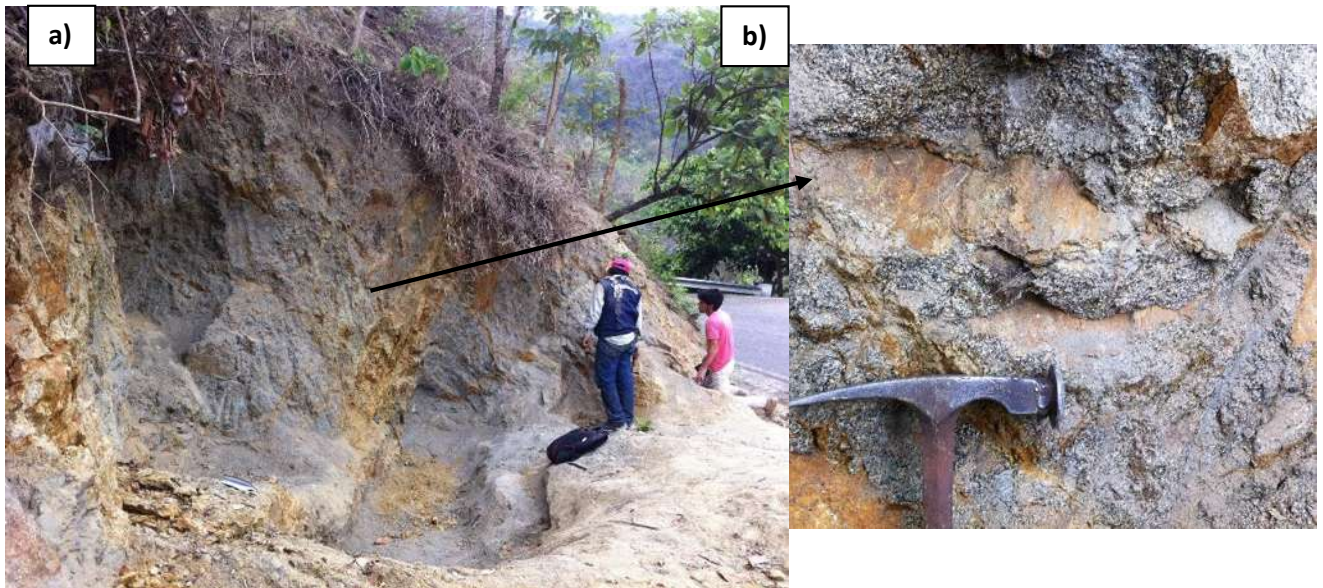


Figura 36. Afloramiento cerca del poblado de Chespal Viejo al NW del Volcán, en donde el afloramiento es de color claro, cuenta con fracturamiento intenso y fallas marcadas con marcadores cinemáticos (estrías) figura B) con alteración de óxidos de tonalidades anaranjadas a amarillo claro.

Los afloramientos rumbo al poblado de Agua Caliente son de masivos de coloración verde a blanco en donde se pueden observar fracturamiento con poca a media alteración en la roca o las fracturas (Figura 37), se pueden observar algunos diques dioríticos cortando a las rocas preexistentes el camino es hacia los poblados de San Miguel y Platanillo, hasta llegar a Agua Caliente, algunas partes diseminados de sulfuros de Hierro.

## Capítulo 5. Resultados



Figura 37. Afloramiento adelante del poblado de Chespal, con rumbo a Agua Caliente. Se pueden observar afloramiento masivo de rocas Granito-Granodiorita siendo cortada por un dique Diorítico. Las fracturas se encuentran desplazadas con el fracturamiento medio y se presentan algunos marcadores cinemáticos como estrías.

La parte Este del CVT, comprendiendo desde el poblado con nombre el Carnicero (SE), hasta Unión Juárez (con rumbo al NE), en donde se hicieron estaciones estructurales a lo largo del Río Suchiate (Figura 38 c), poniendo énfasis en las fracturas y fallas presentes, algunos de los afloramientos vistos, se presentan las rocas masivas, poco fracturadas o/y alteradas, las rocas sufrieron intrusiones posteriores menos profundas de diques más básicos de color verde (Figura 38 a), algunas fracturas también fueron rellenas por cuarzo, en donde se pueden observar algunas oxidaciones solo sobre las fracturas de tonalidades naranja claro (Figura 38 c), además tanto el relleno de fracturas como los diques básicos sufrieron deformación frágil al ser afectados por fallas, las texturas de las rocas en muestra de mano varían en tamaños de los minerales, con texturas porfídicas de color verde a claro (Figura 39 “a” a “c”, que van de Granodioritas a Tonalitas, con minerales de Plagioclasa  $\pm$ Cuarzo, don Horblendas,- Biotitas.



## Capítulo 5. Resultados

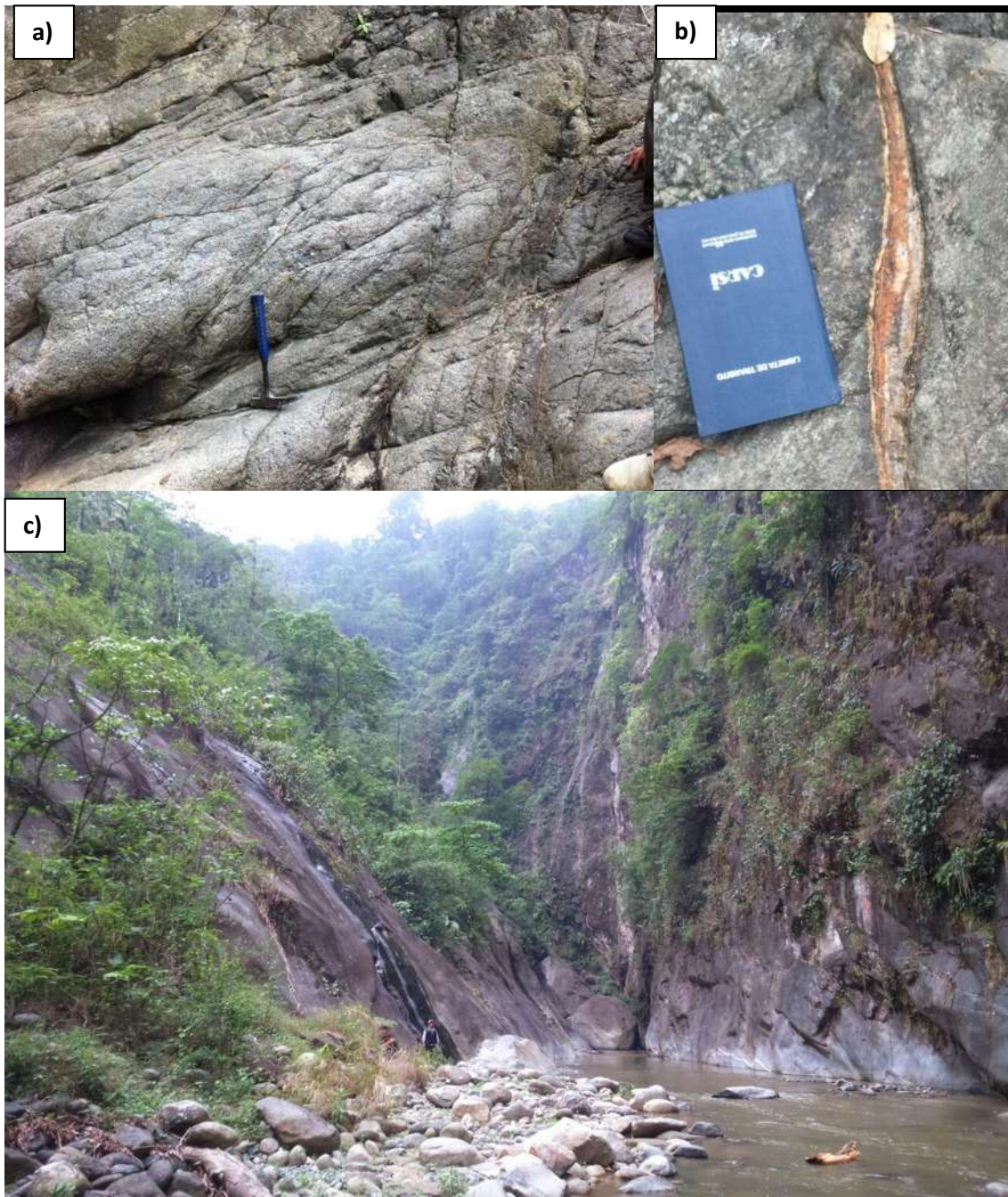


Figura 38. Rocas de a lo largo del río Suchiate al E del CVT, en donde se pueden apreciar en a) afloramiento de roca verde con fracturamiento medio, con fracturas rellenas, y con dique verde composición diorítica desplazado por falla Normal, en b) se pueden apreciar fracturas rellenas por cuarzo, las cuales se pueden observar con oxidaciones de color anaranjado claro y en c) Río Suchiate abajo del poblado de Unión Juárez, vista hacia el Norte, con rocas de color verde poco fracturadas afloramientos con rocas de color verde poco fracturadas.

## Capítulo 5. Resultados

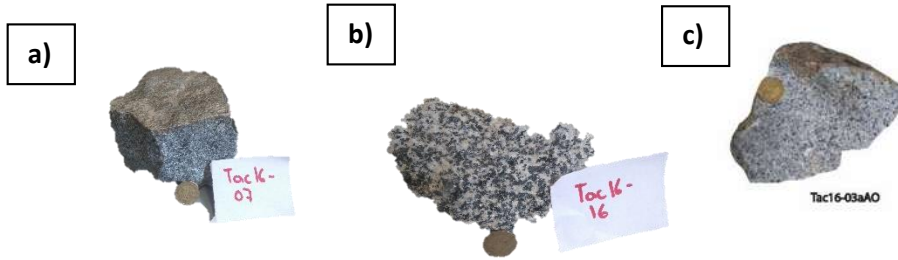


Figura 39. Muestras de mano de las rocas pertenecientes a los afloramiento de río Suchiate en donde: A) se muestra Roca con Textura porfídica de color verde con minerales de Cuarzo, Plagioclasa, Horblenda, B) roca de color verde con textura Fanerítica, con mayor contenido en Horblendas, y C) la tonalidad de esta muestra es clara con textura porfídica, y mayor contenido en Cuarzo, feldespato potásico y Plagioclasa.

En el área de estudio se reconocieron dos tipos de intrusivos sub-volcánicos, el primero es de las rocas hipabisales ácidas (figura 40a) localizadas en la parte Noroeste del área de estudio, adelante del poblado de Toquian Grande, siguiendo la carretera hacia el poblado de Pavencul, se toma la carretera a la izquierda hasta el poblado del Salitre, se encuentran de forma masiva de color amarillo a anaranjado en muestra alterada, con fracturamiento intenso y edad de emplazamiento de 4 Ma. Las rocas hipabisales regularmente provienen de magmas salientes de la cámara magmática principal, con texturas medias a afanítica blanca en muestra de mano se pudieron reconocer minerales como cuarzos, y plagioclasas alteradas por hidrotermalismo, con sulfuros de hierro diseminados. Cabe menciona que los intrusivos de diorita son de color verde con textura afanítica (figura 40b), que cortan a los granitos.

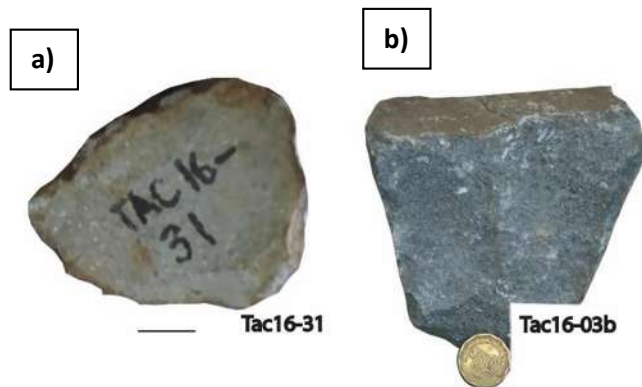


Figura 40. Muestras de mano de A) intrusivo hipabisal aplita con textura porfídica y B) Intrusivo diorítico de color verde afanítico.



## Capítulo 5. Resultados

### 5.3 Petrología

La muestra de mano de las rocas metamórficas son de color verde claro foliada con fracturas oxidas de color anaranjado claro a amarillo, minerales de alteración diseminados como, piritas, <sup>Bt</sup> y carbonatos de cobre (Figura 41 c); en lamina delgada se puede ver una textura foliada con minerales de cuarzo (Qz) policristalino, minerales de alteración Cordierita, epidota (Ep) y algunas biotitas (Bt) con bordes de reacción, y minerales opacos (Figura 41 a, b).

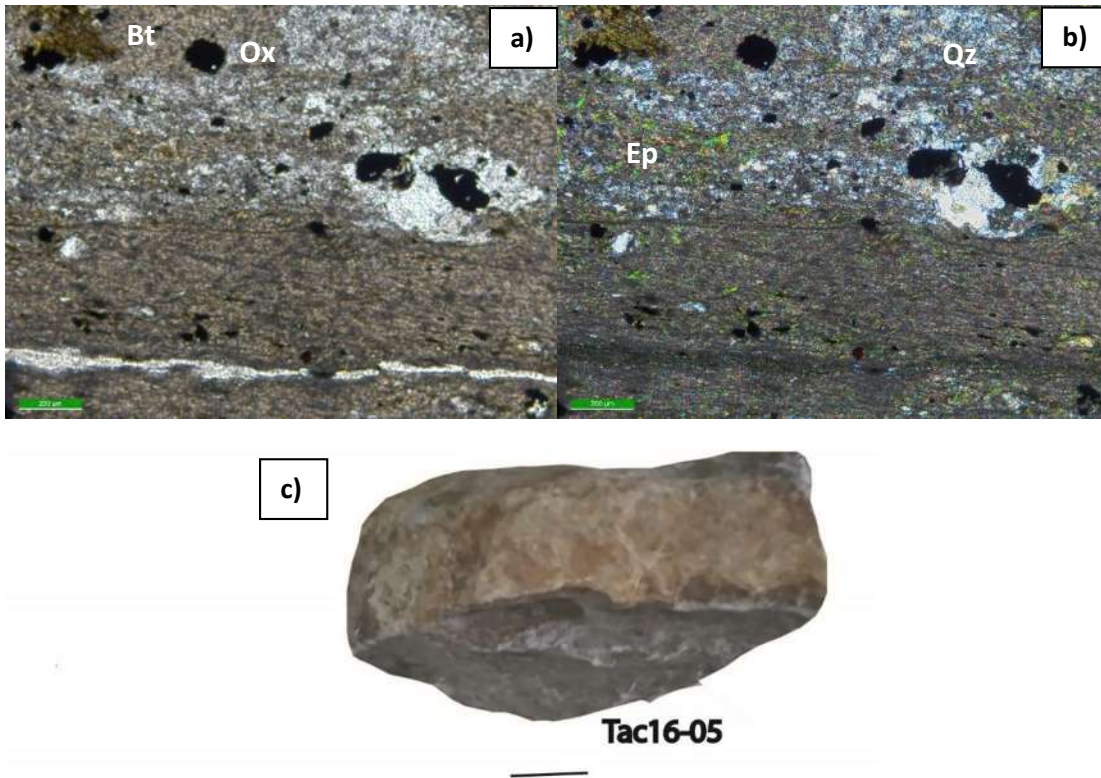


Figura 41. Muestra de roca metamórfica, en lamina delgada y muestra de mano: a) muestra lamina delgada en nicoles paralelos, se puede apreciar foliación en la roca con minerales de color café en la matriz, fracturas rellenas de color blanco y algunos minerales metálicos, b) lamina delgada en nicoles paralelos, se pueden apreciar minerales de opacos, epidotas (Ep), y estructura foliada y c) muestra de mano de color gris claro con alteración en anaranjado claro a amarillo.

## Capítulo 5. Resultados

La lámina delgada perteneciente a la muestra de granito Sibinal (figura 42 a), al NE del Volcán, determino la composición mineralógica, presentando textura equigranular típico de rocas plutónicas holocristalina, los minerales en general son subhedrales, con biotitas con bordes alterados e intercrecimiento de mineral opaco (posibles óxidos), minerales de alteración de epidota (Ep), y algunas fracturas rellenas (figura 43 a y b).

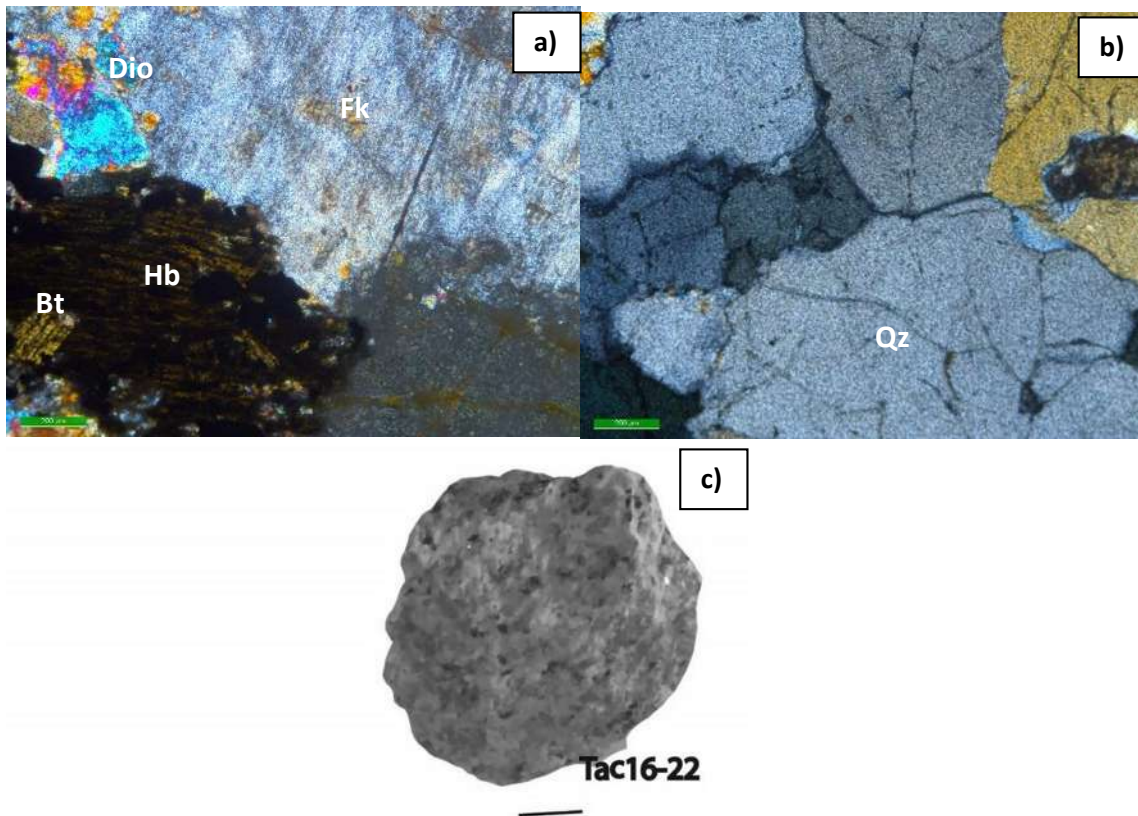


Figura 42. Muestra lamina delgadas de granito Sibinal en nicoles paralelos donde se observa la textura grano-grano, en a) Biotita (Bt) con bordes alterados, feldespato potásico (Fk) con algunos, cuarzo (Qz), epidota (Ep) con fracturas rellenas b) Cuarzos y feldspatos potásicos en contacto y c) muestra de mano de granito.



## Capítulo 5. Resultados

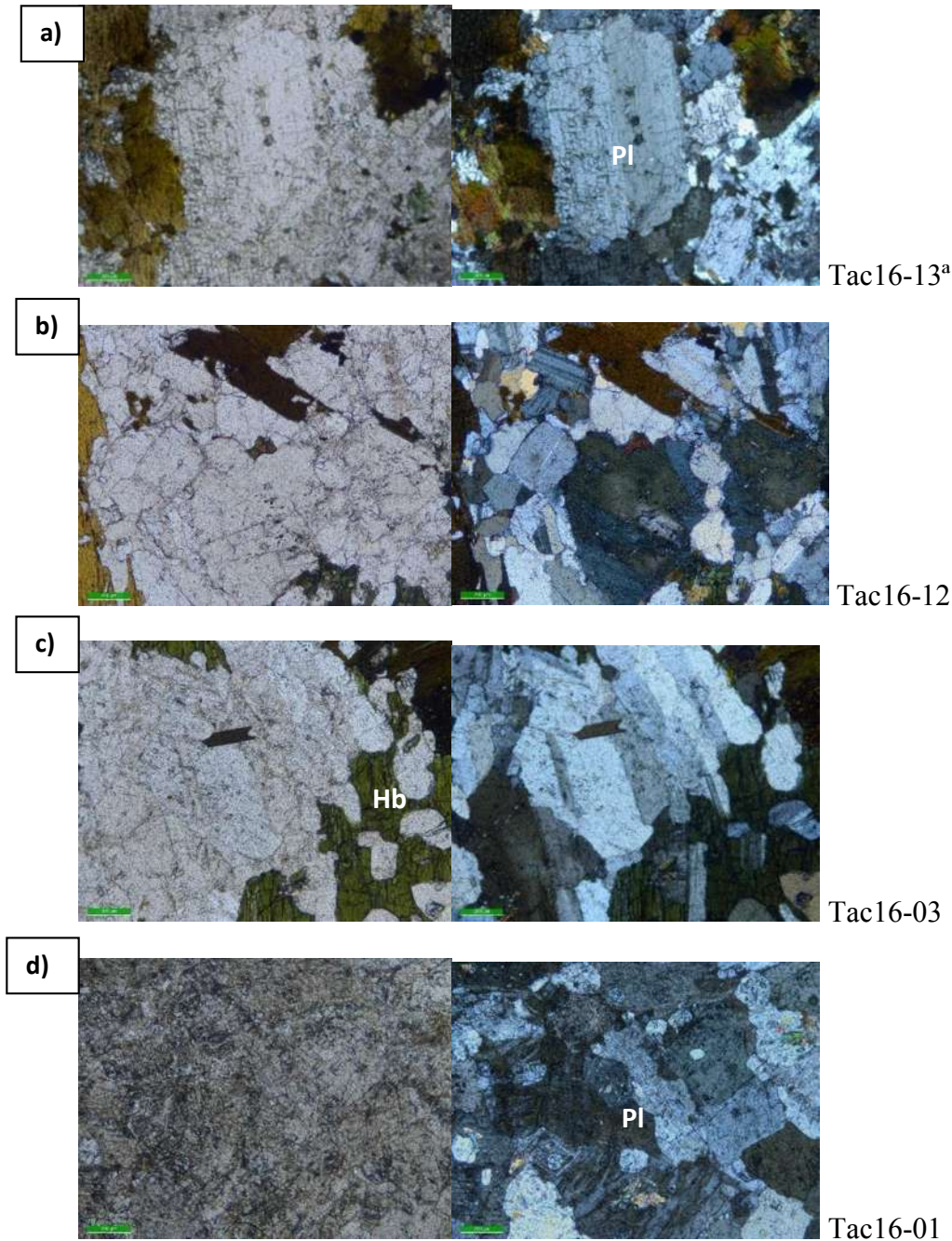


Figura 43. Láminas Delgadas de la parte NW del CVT, la mayor composición es de Plagioclasa, cuarzo y Hornblendas, algunas texturas que se pueden ver es holocristalina, con minerales equigranulares las rocas se clasificaron como Granodioritas en lámina delgada.

Las láminas delgadas que se realizaron en la parte oeste del CVT se presentan en Nicols Cruzados del Lado izquierdo y en Nicols paralelos del lado derecho, los minerales son equigranular típica de rocas intrusivas con una textura Holocristalina de acuerdo al grado de cristalinidad, los minerales de Plagioclasa tienen forma Subhedral con macla Carls Bab y

## Capítulo 5. Resultados

polisintéticos, intercrecimiento de Plagioclasa y feldespato en los cristales de Hornblendas formando texturas Poiquíticas. La Composición mineralógico es Plagioclasa, Cuarzo y Hornblenda, escasos minerales de alteración como epidota (Figura 43).

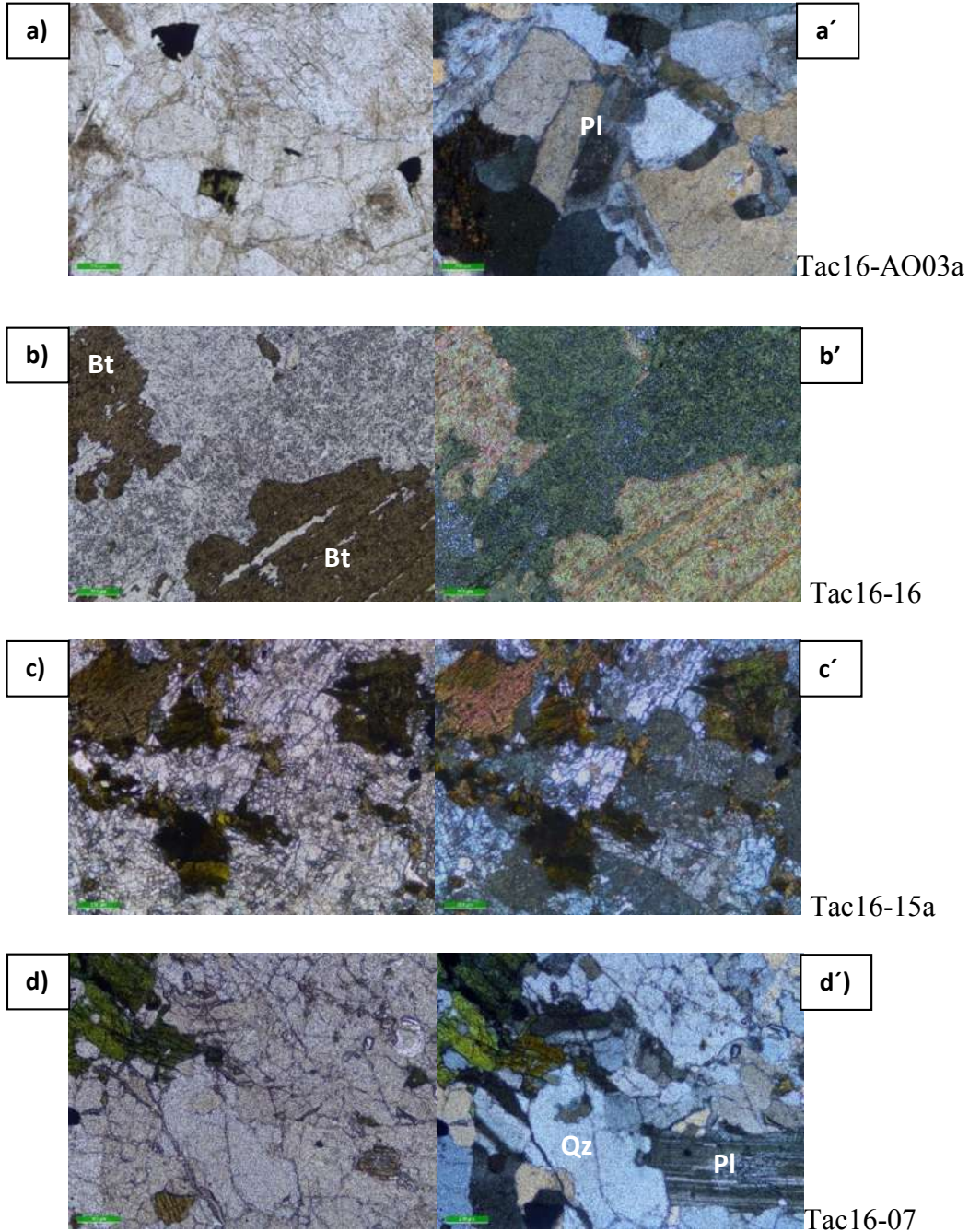


Figura 44. Laminas delgadas de las muestras recolectadas en el Río Suchiate.



## Capítulo 5. Resultados

Las muestras recolectadas a lo largo del Río Suchiate se analizaron en forma de láminas delgadas, para observar los diferentes grupos minerales, en donde las texturas más comunes son equigranulares, holocristalinas, con minerales interconectados, textura subhedral, cuarzos y plagioclasas con anfíboles con intercrecimiento de minerales de sílice (figura 44 a y b). Biotitas anhedrales con posible alteración hidrotermal, y cuarzos policristalinos (figura 44 c). En algunos cuarzos se pueden observar relleno de mineral oscuro (posibles óxidos), con horblendas anhedrales y minerales en intercrecimiento (Figura 44 d). Las rocas hipabisales con textura media a afanítica, de color blanca en muestra de mano, donde se pudieron reconocer minerales como cuarzos y plagioclasas alteradas por hidrotermalismo, con sulfuros de hierro diseminados (Figura 45 a y b).

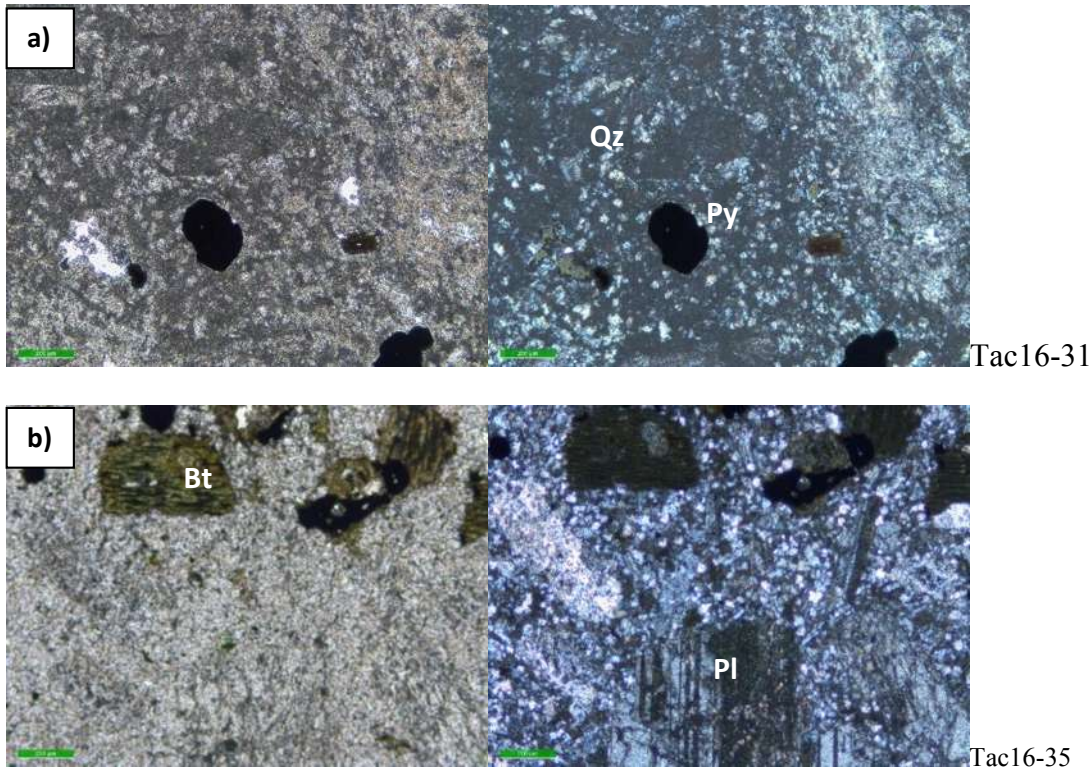


Figura 45. Láminas delgadas de muestras una textura porfídica con mesostasis de cuarzo (Qz) microcristalino con plagioclasas (Pl), en a) se pueden observar en mayor cantidad mesostasis con fenocristales de cuarzo (Qz) y algunos minerales opacos, posiblemente pirita (Py), y b) fenocristales de plagioclasas (Pl) con textura tipo albíta con biotitas (Bt) subhedral a anhedral con incrustación de minerales opacos.

## Capítulo 5. Resultados

### 5.4 Geología estructural

Los eventos en donde se emplazaron los granitoides se pueden dividir en 3 acontecimientos por su relación de edad (Figura 46), el primero de 45.79 a 29 Ma en donde la relación de los esfuerzos que se pudieron recolectar en fracturas dos principales rumbos NE-SW y N-S (figura 46) y para las fallas reportadas en su mayoría son laterales derechas con  $\sigma_{max}$  WNW-ESE preferentemente. Una segunda de 21.56 a 18.76 Ma (figura 46), donde predominan las fallas normales con orientaciones NW-SE y busamiento al SW, los  $\sigma_{min}$  presente con dirección NE-SW sobre el río Suchiate, siguiendo al norte con rumbo al poblado de Sibinal, Guatemala y una última de 15.06 a 12.2 (figura 46), los sistemas de fracturas preferenciales NE-SW y N-S con  $\sigma_{max}$  de la misma dirección, las fallas encontradas y localizadas en la zona son de tipo normal N-S con componentes lateral izquierdo, la mineralogía de estas unidades muestran una disminución en silice de formación en su mayoría granodeoritas, cabe mencionar que a los 4.56 Ma se emplaza un dique aplítico en la zona NW del campo donde la roca presenta una alteración intensa en donde las direcciones preferenciales de las fracturas se encuentran al E-W, NW-SE con fallas normales a N90 grados (figura 54). Los diques dioríticos que cortan a los granitos y granodeoritas tienen tendencias NE-SW y unas fracturas conjugadas con sigma de máxima compresión en dirección NW-SE.

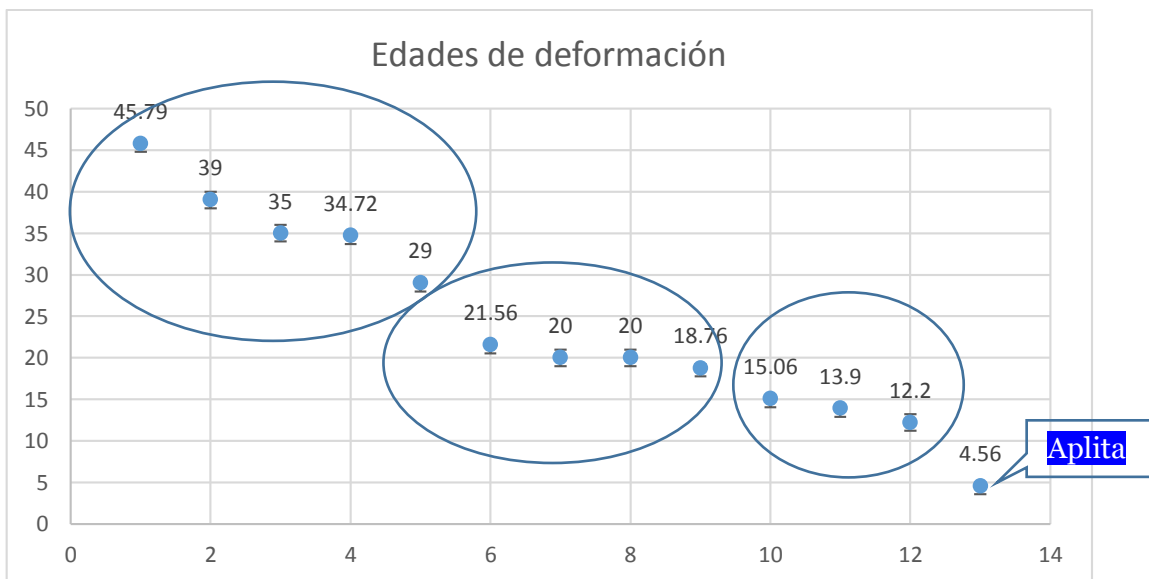


Figura 46. Etapas de emplazamiento de granitos en donde el eje de las “X” son los eventos de mayor a menor edad, y el eje de las “Y” son millones de años calculados para cada muestra con el método radiométrico de U-Pb en zircones

## Capítulo 5. Resultados

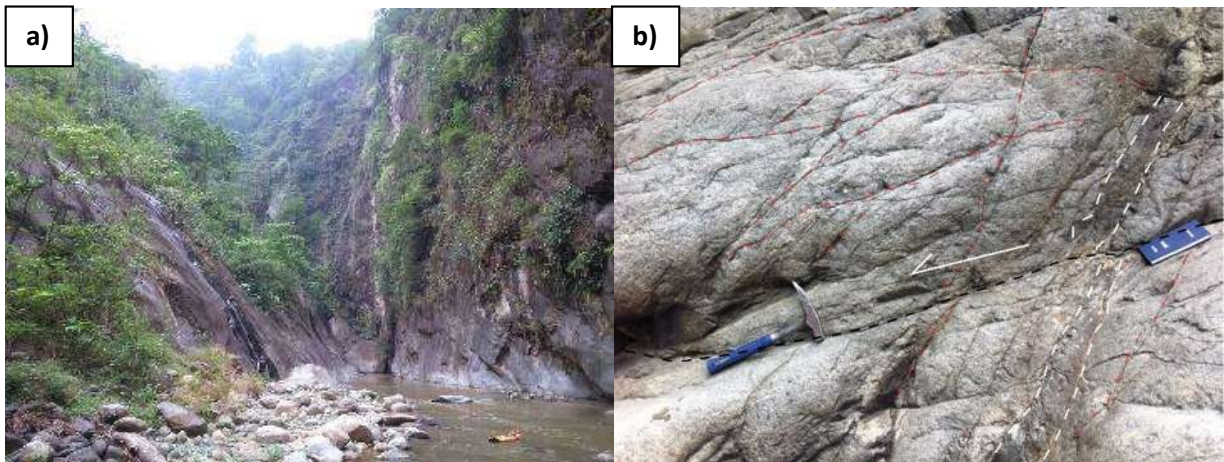


Figura 47. Muestra afloramientos sobre el Río Suchiate. Donde a) Cauce del Río en la Frontera con Guatemala y b) afloramiento de Roca granodeorita cortado por dique diorítico que presenta fracturas medias y falla que corta al dique.

Los afloramientos en la Parte este del CVT, se encuentran en general poco alterados, con fracturamiento medio (Figura 47 a), en donde las rocas al sur del Río Suchiate son preferentemente Granodeoritas con mesostasis porfídica, de color verde claro, las fracturas son rellenas por mineralización de color claro (cuarzo), se presentan diques con direcciones N-S con espesores variables entre 10 a 100 cm. Algunas vetas rellenas por mineral claro silicio (figura 48).



Figura 48. Afloramiento localizado al Sur del CVT y al norte del poblado Cacahoatan, Roca verde de composición Granodeorita, que tiene vetillas rellenas, contadas por fallas normales.



## Capítulo 5. Resultados

### Mapa Estructural de Tacaná

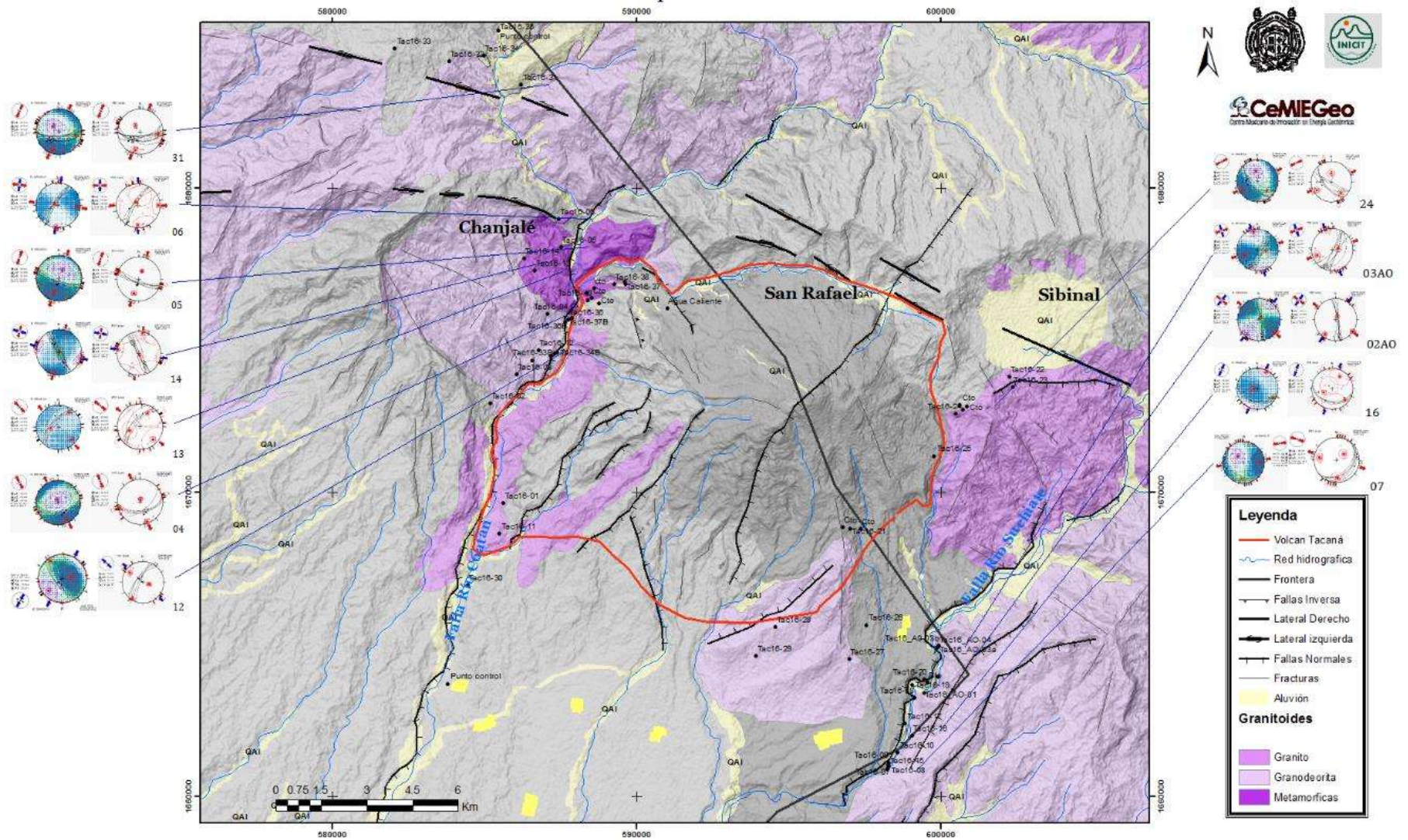


Figura 49. Mapa estructural muestra las principales fallas y fracturas regionales, se pueden ver los estereogramas con las fallas medidas en campo y los esfuerzos pertenecientes a las mismas.



## Capítulo 5. Resultados

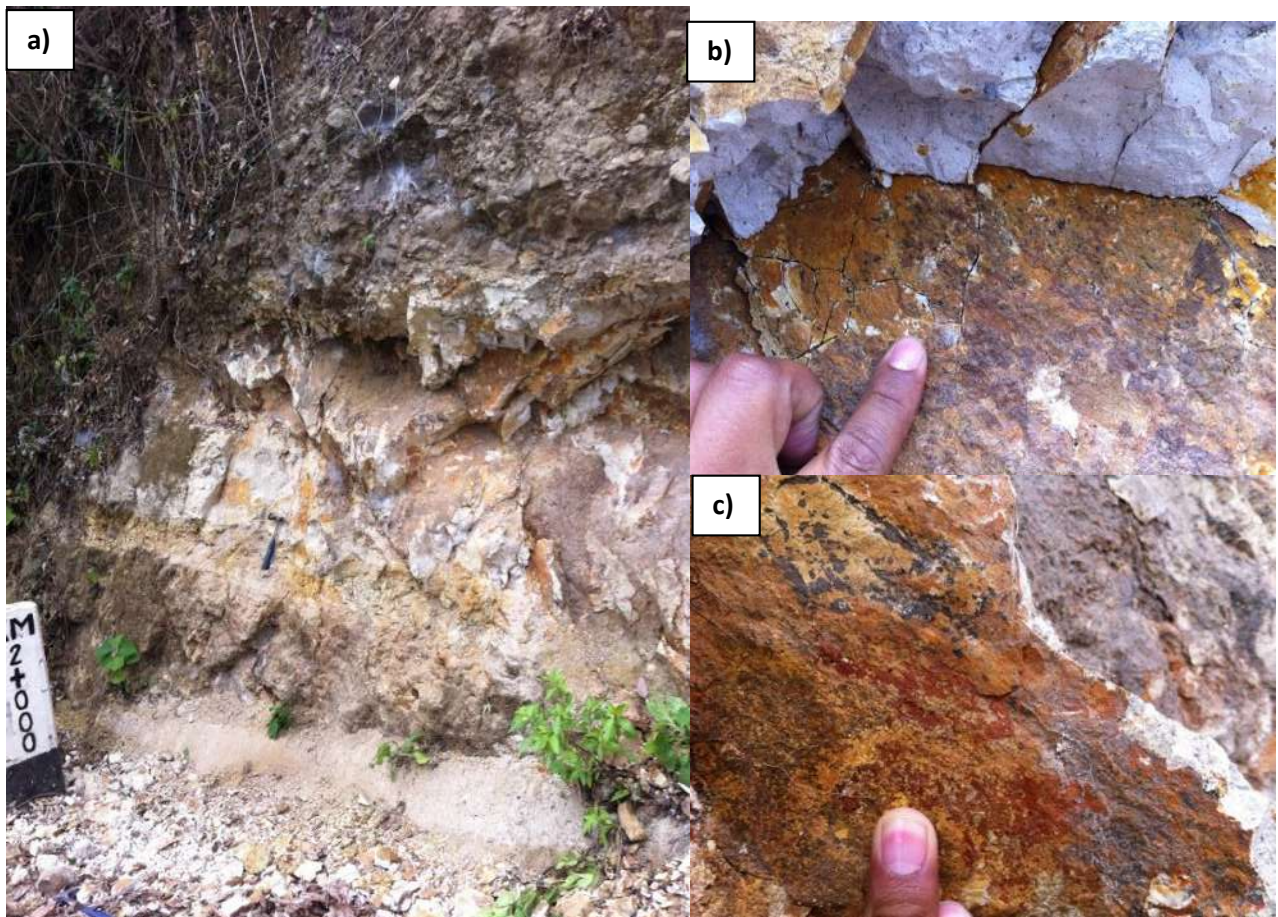


Figura 50. Depósitos Volcánicos de flujo fallados SW cerca del poblado La Boquilla en contacto con granitos.

Se pudieron reconocer productos volcánicos de flujo piroclástico en contacto con granitos, el depósito es de color café con presencia de clastos de 6 a 20 cm (figura 50 a), redondeados, matriz de lapilli grueso con oxidaciones de color rojo oscuro a amarillo (figura 50 c), la mineralogía es de anfíboles, cuarzo y Plagioclasa. Se encuentra evidencia de estrías (figura 50 b) de fallas normales, con dirección predominante de N 245.

Respecto al fracturamiento en la zona se encontraron principalmente tres sistemas los cuales se encuentran afectando a las diferentes litologías, se le dio mayor importancia a las rocas del basamento como son las rocas metamórficas y las plutónicas, que en el caso de Tacaná estarían albergando el yacimiento Geotérmico. Para esto, se realizó una campaña en campo,

## Capítulo 5. Resultados

tratando de tener el mayor número de datos alrededor de la zona distribuida principalmente sobre el río Coatán al NW y Río Suchiate SE, buscando afloramientos que nos permitieran, tanto describir las rocas, la toma de datos estructurales, realizar un ajuste a la cartografía realizada previamente.

En el caso de las rocas metamórficas se describieron afloramientos al Noroeste del CVT donde se aprecian rocas con bastante silicificación en gneises, así como rocas metamórficas de bajo grado (Figura 51). Los afloramientos se encuentran intensamente fracturados con en tres direcciones principalmente NE-SW, NW-SE y NNW-SSE. Los afloramientos se encuentran afectados por fluidos hidrotermales, dejando algunos minerales como azuritas, malaquitas, piritas.



Figura 51. Afloramiento al NW del Volcán donde se aprecia el fracturamiento intenso, de aproximadamente 15m de altura con rocas metamórficas (gneis, esquistos) oxidaciones de color naranja.

Entre los afloramientos visitados se encuentra en la zona NE cerca del poblado de Sibinal en Guatemala, de la zona un granito en muestra de mano de color blanco, con textura fanerítico con fenocristales de feldespatos potásicos, cuarzo, -horblenda y mineral accesorio de piritas y epidota, el afloramiento presenta oxidaciones color anaranjado y un fracturamiento intenso (figura 52). El fracturamiento en la zona tienen direcciones preferenciales con direcciones E-



## Capítulo 5. Resultados

W y Fracturas compuestas NW-SE y NE-SW con una compresión en  $\sigma_1$  WNW-ESE (Figura 55).

Al NW del CVT se muestran afloramientos de Granodioritas, Granitos y en algunos casos cortados por diques dioríticos, en algunos casos en particular al cerca del Poblado de Pavincul, la roca se presenta intensamente fracturada, oxidación intensa de color rojo a anaranjado, la roca es de color blanco donde no se alcanzan a distinguir con facilidad los minerales, con dos direcciones de fracturamiento NW-SE y casi N-S (figura 55).



Figura 52. Muestra afloramiento de roca porfídica granítica cerca del poblado de Sibinal, Guatemala. Las líneas rojas muestran el fracturamiento en el afloramiento.

Por otro lado las rocas plutónicas que afloran al sur del volcán, presentan un fracturamiento menos intenso que las del norte, teniendo al SE solo granodioritas descritas en muestra de mano, las cuales son cortadas en algunos casos por intrusivos de hasta 1 metro de espesor de color verde, en muestra de mano presentan textura afanítica, de composición diorítica, en algunos casos se presentan mineralizados con piritas, calcopiritas, el fracturamiento tiene comportamiento E-W, NNE-SSW, y en ocasiones se presentan fracturas compuestas con una compresión en  $\sigma_1$  N-S (Figura 55).

## Capítulo 5. Resultados

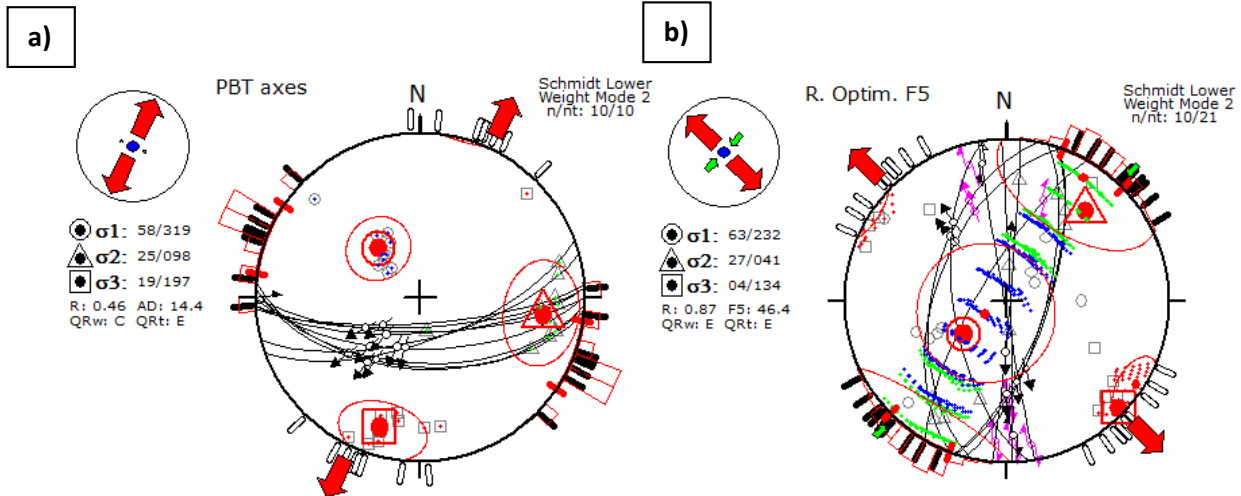


Figura 53. Representación gráfica de los datos en campo de las fallas en las rocas hipabisales, en donde: a) rumbo preferencial E-W de fallas normales con componente derecha, y un  $\sigma_{\min}$  NE-SW y en b) datos de fallas normales con componente derecha, con  $\sigma_{\min}$  de NW-SE.

En relación a las fallas y fracturas, las rocas alojadas al NW del área pasando el poblado de Tonalá al oeste, se presentan rocas hipabisales con fracturamiento intenso con estrías que indican en movimiento mixto normal con una componente derecha (figura 54) en dos direcciones, su relación en corte nos deja como el primer esfuerzo para las fallas con dirección E-W (figura 53a) y  $\sigma_{\min}$  NE-SW (figura 53b), como segundo a los rumbos de N-S con un  $\sigma_{\min}$  con dirección NW-SE. Las rocas muestran intensa alteración interna, con diseminados de sulfuros de Hierro, las fracturas se encuentran abiertas, e interconectadas, lo cual evidencia una buena permeabilidad de la roca.

## Capítulo 5. Resultados

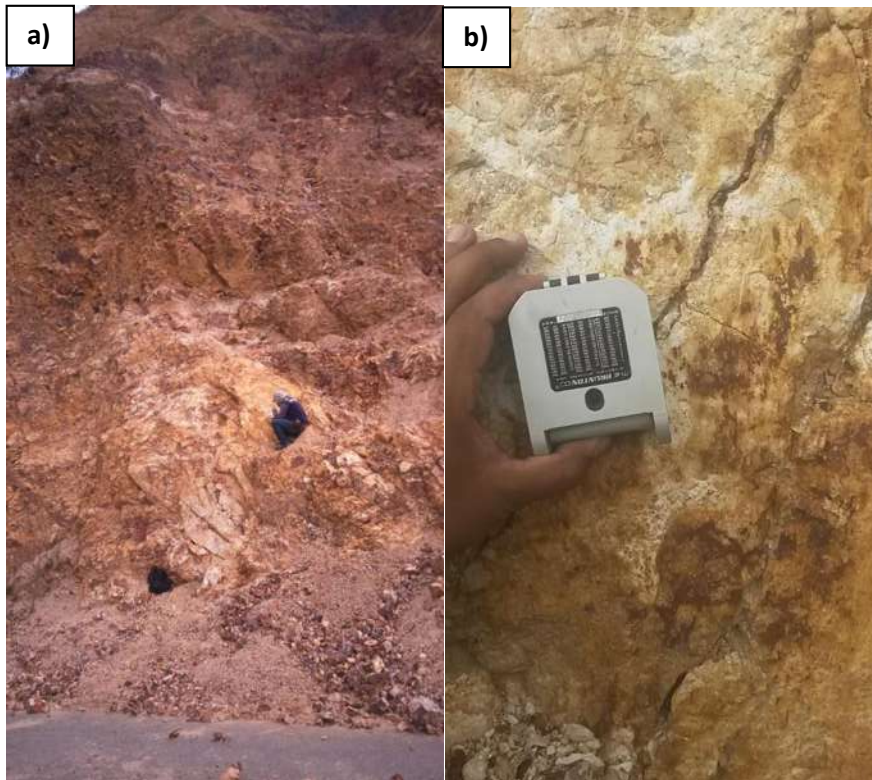


Figura 54 .Afloramientos de roca hipabisal, en donde a) afloramiento con rocas ácidas con alteración intensa, de color rojo a anaranjado, en donde se pueden observar el intenso fracturamiento de la roca, y b) evidencia de la cinemática de la zona, con fracturas abiertas sin relleno.

Al SW del área de estudio se trató de tomar los mejores afloramientos siguiendo las faldas del río Coatán, en las cuales se encontraron rocas como granitos, granodioritas y dioritas, las principales direcciones que se encontraron fueron NE-SW, N-S (Figura 55). Se levantaron más de 40 estaciones estructurales alrededor de la zona de estudio, mostrando el fracturamiento más intenso en la parte norte del Volcán, de acuerdo con García-Palomo *et al.*, (2006), el CVT está afectado por tres sistemas importantes: el primero y más antiguo, se encuentra hacia el oeste constituido por fracturas y fallas con direcciones NW-SE, el segundo sistema presenta alineaciones NE-SW misma dirección que el CVT, el tercero y más nuevo es el N-S. El sistema más importante, es el que forma el Graben Tacaná, formado por las fallas río Sushiate al este y la falla Coatán al Oeste que son cortados por el sistema más nuevo N-S.



## Capítulo 5. Resultados

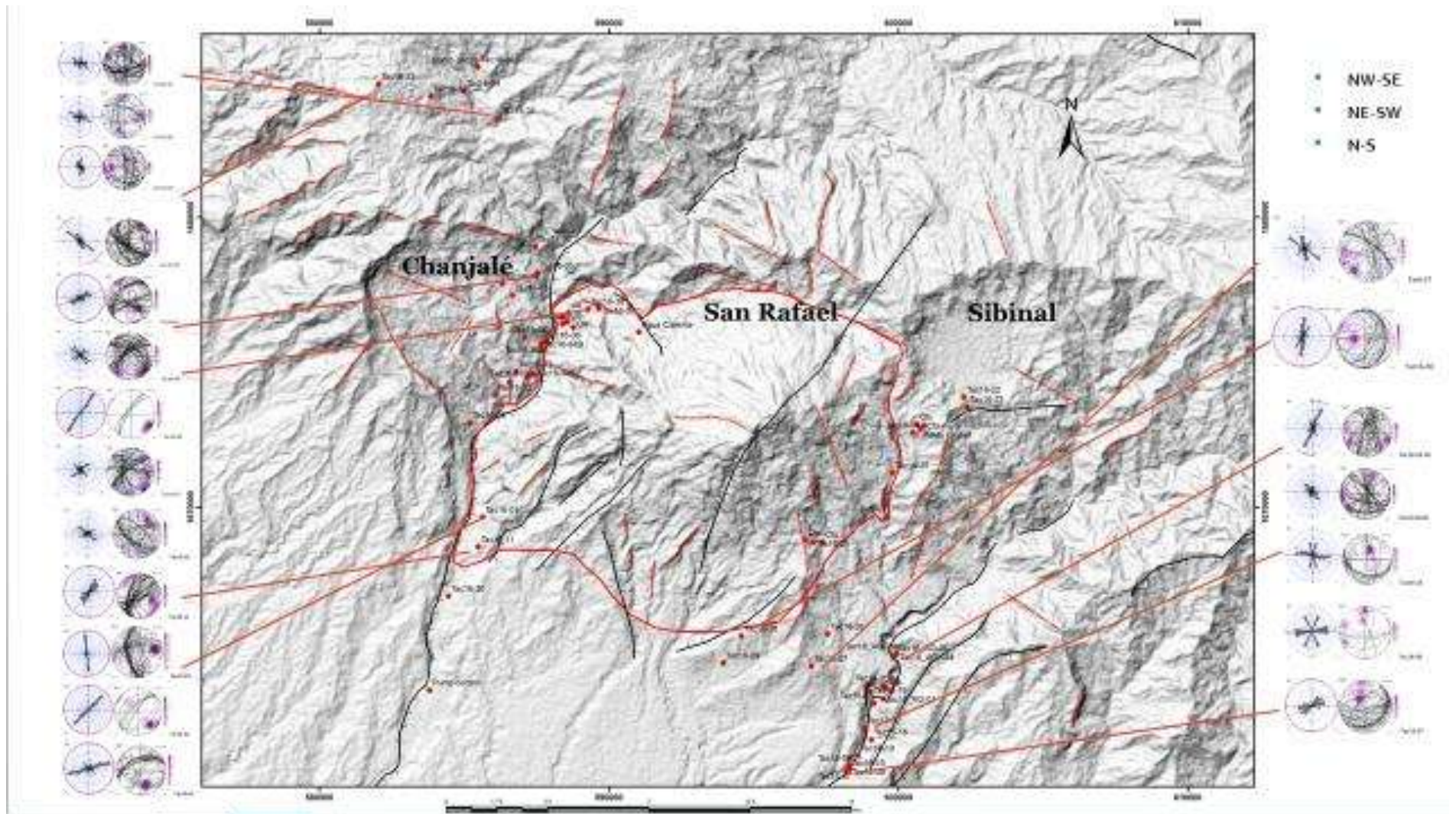


Figura 55. Mapa estructural de la zona, donde se muestran en color negro las principales fallas de tipo normal, los puntos rojos representan las estaciones estructurales, y en los laterales se muestran los estereogramas del fracturamiento medido en campo.

## Capítulo 5. Resultados

Se tomaron en cuenta todas las dataciones hechas en las rocas de basamento por otros autores y las realizadas en este trabajo (figura 56), para relacionar con eventos en los cuales se llevaron a cabo el emplazamiento de los diferentes cuerpos graníticos. Se pudieron relacionar de acuerdo a su proximidad 3 eventos: el primero del Eoceno Medio a Oligoceno Tardío (45.79 a 29 Ma.), contemporáneos a la apertura de la fosa de Caimán en el Paleógeno, la segunda etapa de intrusiva generada en el Mioceno Tardío (21.56 a 18.76 Ma.) y por último en el Mioceno Medio (15.06 a 12.2 Ma.) en donde el movimiento relativo entre las placas de Norte América y Caribe con dirección WNW generan fallas lateral izquierdo activado en el Mioceno Medio.

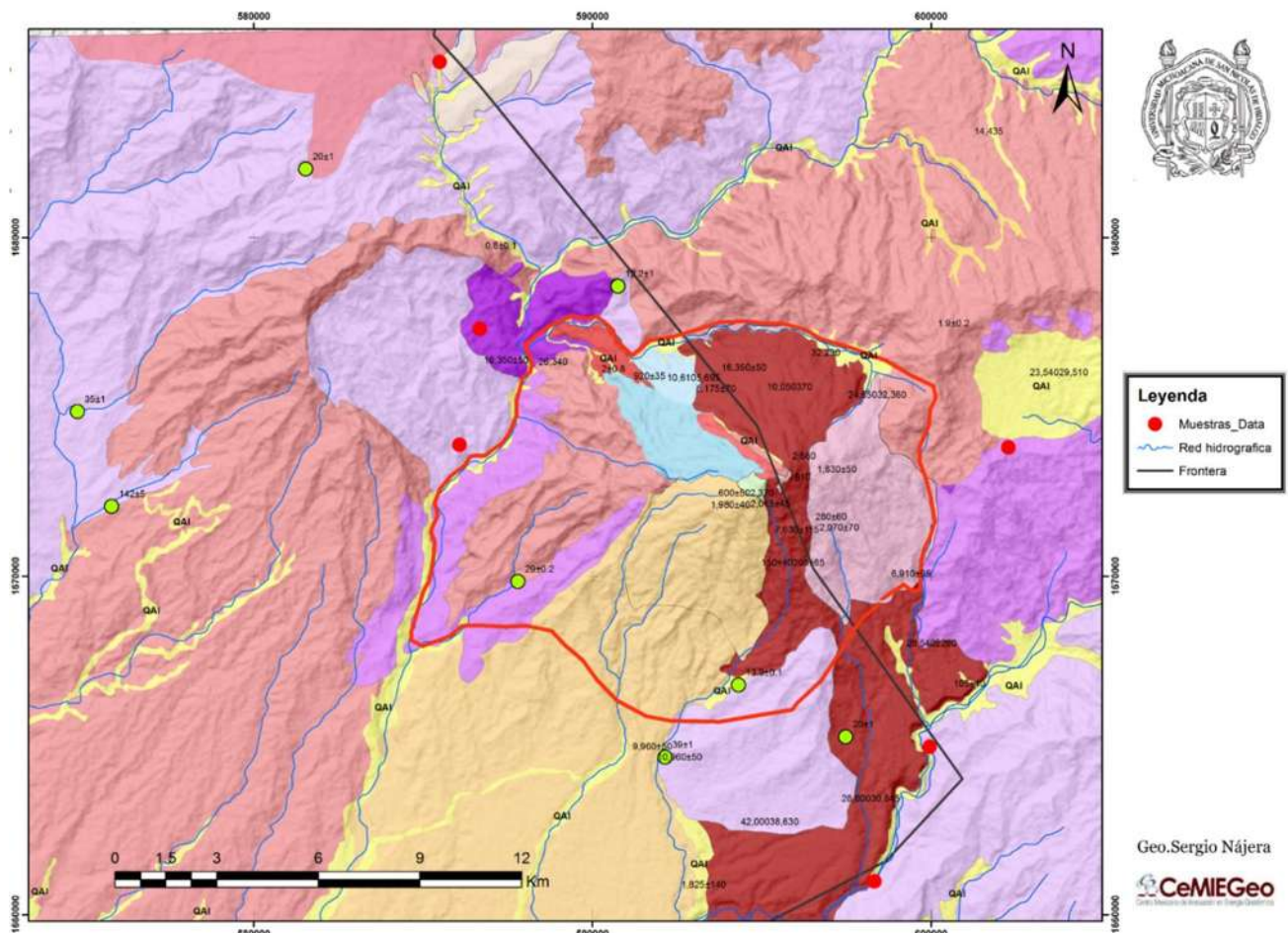


Figura 56. Mapa de distribución de dataciones radiométricas con distintos métodos, con puntos de color amarillo, se muestra la distribución de las dataciones en la bibliografía consultada, y los puntos rojos son las dataciones realizadas con el método U-Pb en zircones, realizada en el laboratorio de Isotopía del CeGeo, Querétaro.



## Capítulo 5. Resultados

### 5.5 MECANISMOS FOCALES

Continuando con los estudios cinemáticos recientes de la zona se analizan los mecanismos focales y su relación con las fallas cuando los esfuerzos a los que se someten las rocas no son soportados y se rompen subitamente, liberando energía elástica en forma de ondas y se evidencian por medio de sismicidad en el terreno, recolectando la información del Global CMT Project desde el 1970 al 2015. En donde podemos georeferenciar los epicentros de los diferentes eventos, la figura 58 muestra los mecanismos focales diferenciados en función del tipo de fallamiento que representa: los colores negros se muestran las fallas normales, los azules como fallas de cizalla y los círculos rojos como fallas inversas (Figura 58).

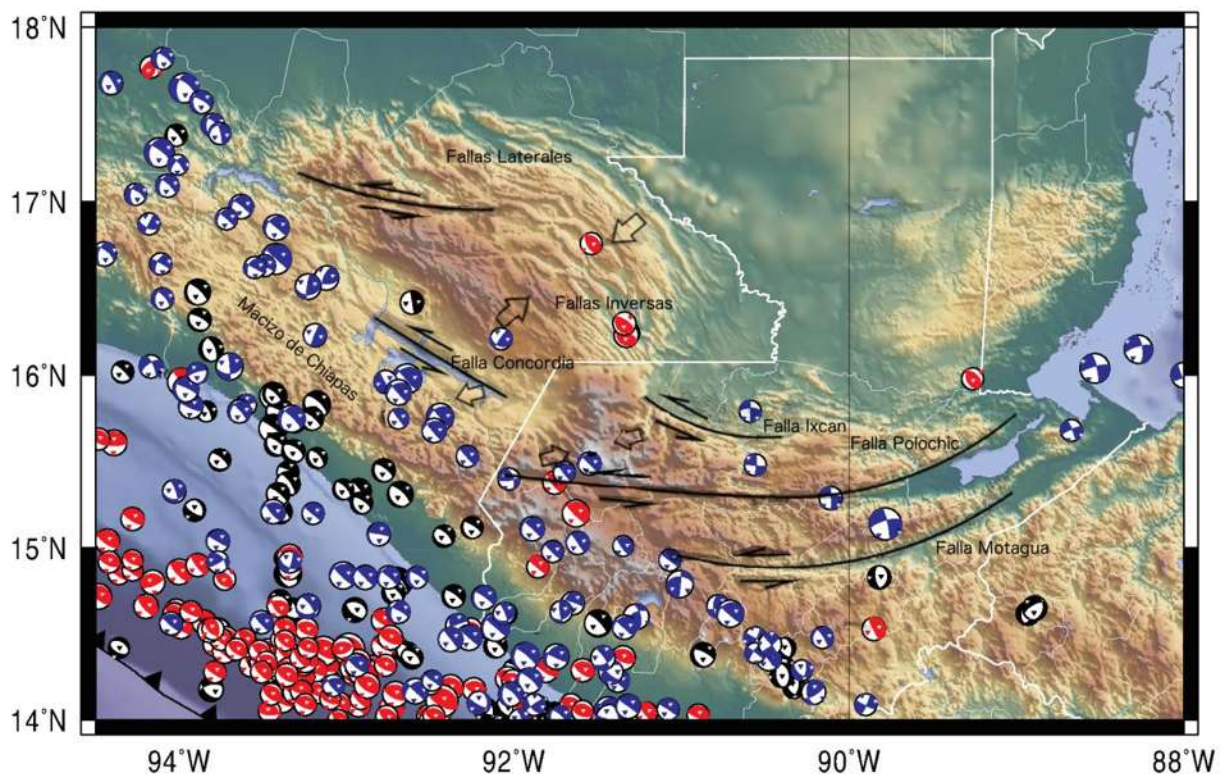


Figura 57. Mapa al sur de México y parte de Guatemala, en donde se muestran mecanismos focales con datos recolectados del Global CMT Project, las circunferencias de color negro pertenecen a los mecanismos de fallas normales, las circunferencias de color rojo corresponden a los mecanismo de fallas inversas y por último las circunferencias de color azul muestran los mecanismos de fallas de tipo lateral (Izquierdo, derecho u oblicuo).

## **Capítulo 5. Resultados**

Los mecanismos focales de color rojo, presentan una concentración en una dirección de NW-SE con mejores concentraciones en las partes marinas, en la zona donde inicia la subducción entre la placa de Cocos subduciendo a las placas de Norte America y la placa del Caribe con la compresión de dirección NE, en donde podemos ver algunos mecanismos de extensión producto del relajamiento de la subducción (Figura 57 ).

Realizamos dos perfiles cortando al CVT uno paralelo y otro perpendicular a la trinchera, sin considerar los mecanismos focales asociados a la subducción (inversos), que se muestra con un triangulo color rojo (figura 58), el primer perfil A-A' con una dirección de SW hacia el NE de 150 Km de distancia, en el cual se puede observar para los mecanismos normales, en donde los eventos sísmicos en inicio se encuentran en una zona someras de la corteza solida, se profundizan en dirección del volcán con un máximo de -100 km que pudieran pertenecer a la expansión del graben Tacaná. Y para los mecanismos azules de cizalla de mismas direcciones y longitudes, dos eventos menores a 40 km de profundidad, en donde los mecanismos cercanos al volcán posiblemente perteneciente al movimiento activo del sistema de fallas Polochic-Motagua.

Las zonas activas al sur de México se encuentran orientados con la trinchera, relacionados a la zona de subducción de Cocos y a las fallas regionales de tipo lateral. De acuerdo a las profundidades de los perfiles podemos mencionar que en el caso de las fallas normales inician con sismos muy someros cercanas a la trinchera y conforme avanzan hacia el continente los sismos se hacen profundos hasta los -120 km, los cuales podrían estar relacionados a la interacción de las placas en la zona de Benioff. En el caso de los sismos laterales se observa un comportamiento de las profundidades alrededor de los -120 a -160 km, debido a fallas regionales que se extienden hasta esas profundidades, y que sirven de conducto para el ascenso de fluidos a la superficie.

## Capítulo 5. Resultados

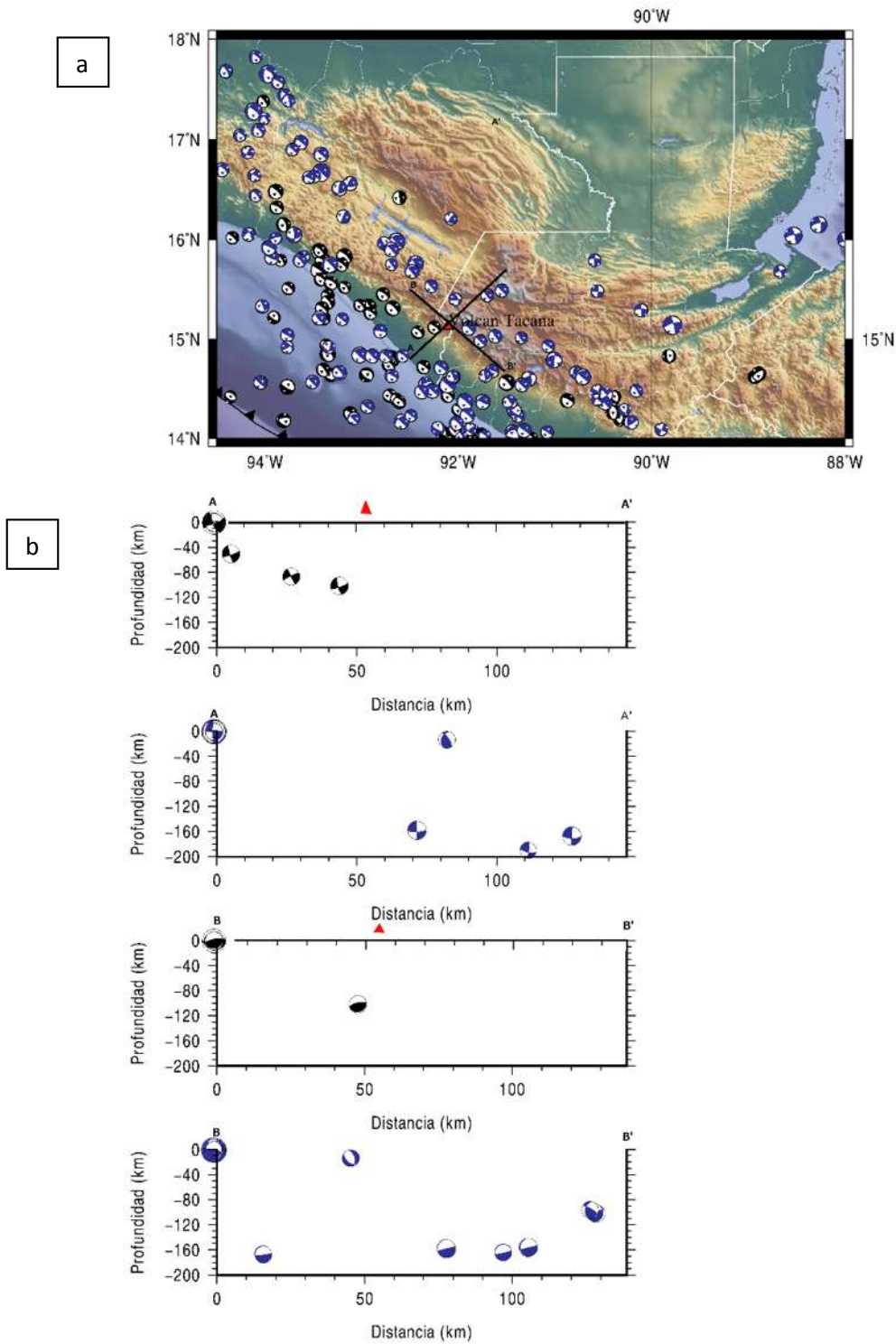


Figura 58. Muestra los mecanismos focales de color negro los mecanismos de fallas normales y de color azul los mecanismos laterales (figura 58 a), se generan dos secciones a profundidad, en donde el rectángulo rojo se muestra el volcán de Tacaná, los dos primeros perfiles b) (A, A') son en la dirección SW-NE y el segundo (B-B') para la dirección NW-SE.



## Capítulo 5. Resultados

### 5.6 Manifestaciones Termales y Permeabilidad

Las manifestaciones hidrotermales son exposiciones de los fluidos calientes en la superficie, suelen depositarse con fluidos ricos en salmueras de cuarzo o sinter, y minerales de alteración, como epidota, clorita, los cuales indican altas temperaturas en el subsuelo, en el CVT las manifestaciones hidrotermales se encuentran en las rocas Granodioritas en donde la permeabilidad se debe al fracturamiento que es el principal conducto para transportar los fluidos hacia la superficie, para el CVT las manifestaciones hidrotermales se encuentran principalmente en el NW de CVT (Figura 59) las cuales corren a lo largo los ríos tributarios que alimentan a el río Coatán, cartografiadas y con datos geoquímicos por Rouwet y su equipo de trabajo en el 2004.

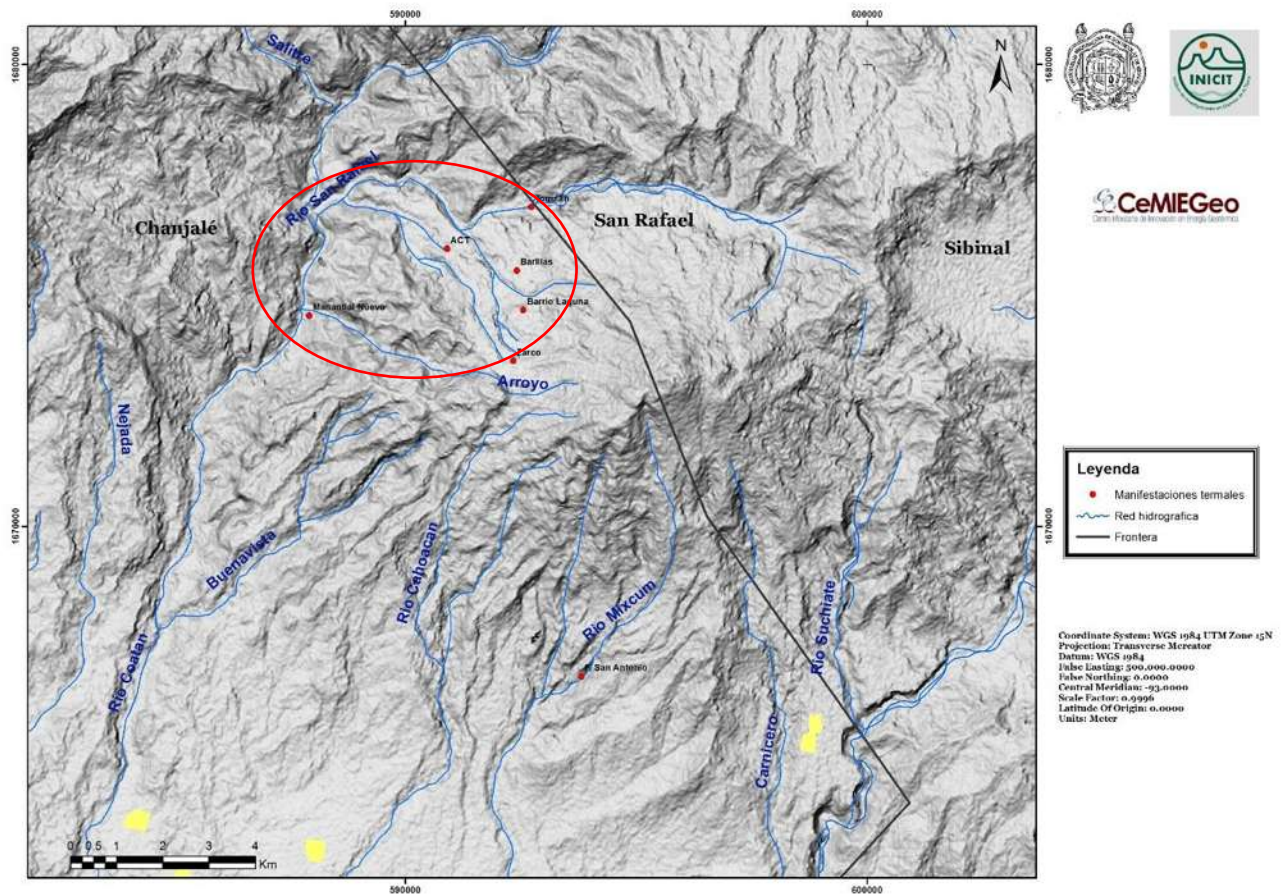


Figura 59. Localización de las manifestaciones hidrotermales. Modificado de Taran (2014) y Rouwet (2006).

## Capítulo 5. Resultados

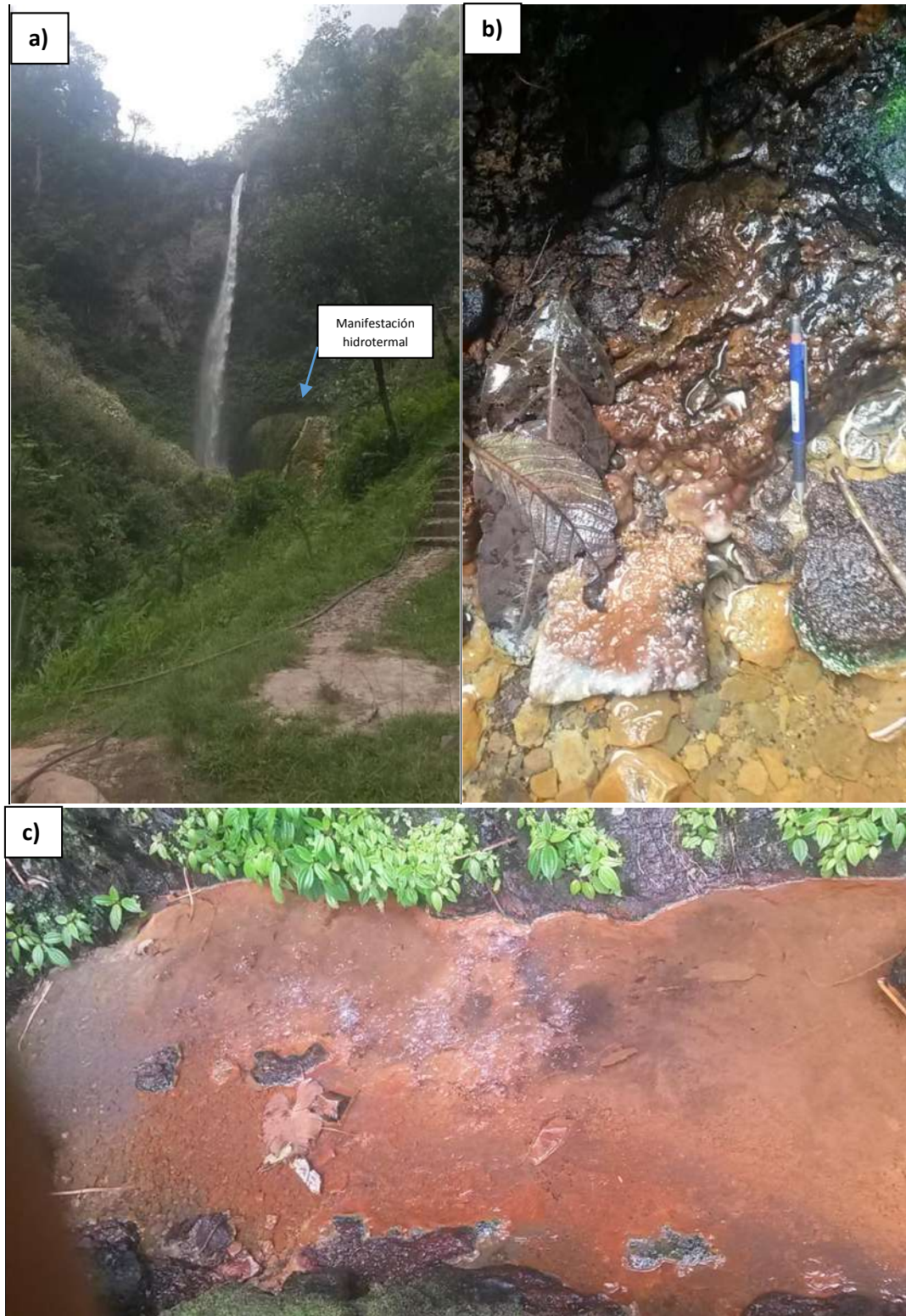


Figura 60. Manifestaciones hidrotermales en el poblado de Agua Caliente en donde a) afloramiento en donde se encuentra a la base de la cascada la manifestación hidrotermal b) minerales de alteración con oxidaciones y c) depósito de agua con minerales de sílice.

## **Capítulo 5. Resultados**

Una de las manifestaciones importantes, son las que se encuentran en Agua Caliente (ACT Figura 59), en donde se pueden observar las manifestaciones a un lado de una cascada que lleva el mismo nombre (figura 60 a), localizada a 1125 msnm. Se encuentra en contacto con depósitos de una avalancha de escombros, las manifestaciones se encuentran a un costado, con una altura de 1.80 m de depósito con forma elipsoidal con un rumbo de N110, resaltan las alteraciones con óxidos (figura 60 c), la roca de composición granodiorita, con minerales de alteración como clorita, y las fracturas se encuentran rellenas de sílice, con una temperatura medida en campo de 40°C.

La permeabilidad basado en la microtomografía es una técnica no invasiva o destructiva que se realizó con el objetivo de obtener imágenes 3D de las muestras con la ayuda de núcleos de 6 mm de diámetro en cada roca distribuidas aleatoriamente en el campo (ver figura 61), las muestras analizadas no se encuentran fracturadas por lo cual los datos obtenidos de permeabilidad son de la permeabilidad la consideramos como primaria, que depende de la interconectividad de los minerales, las rocas que se estudiaron presentan características similares en composición, clasificadas como granodioritas a excepción de la muestra Tac16-22 que se clasifica como granito. Las simulaciones numéricas de permeabilidad fueron realizadas en la porosidad real obtenida a partir del análisis de imágenes con la ayuda del software GeoDict, utilizando la viscosidad del vapor de agua.



## Capítulo 5. Resultados

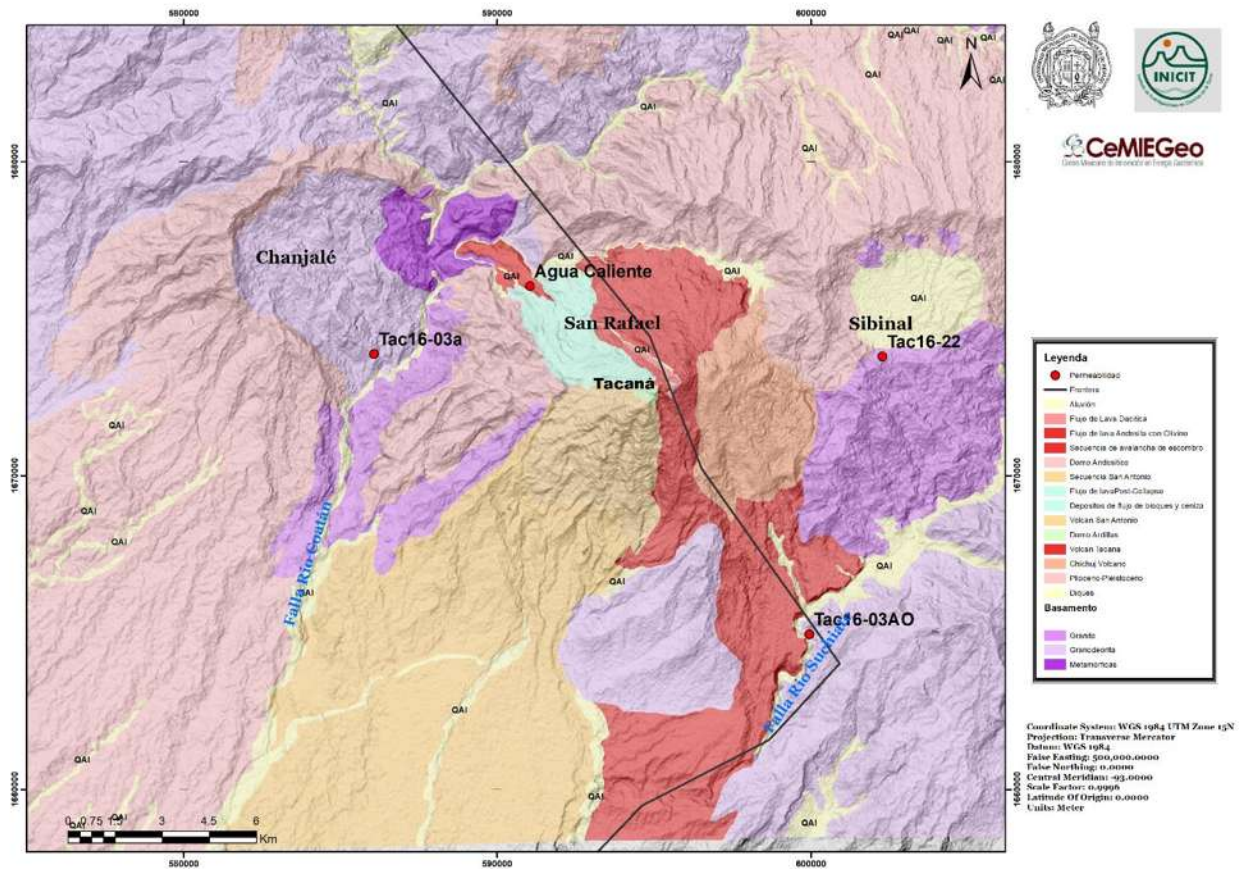


Figura 61. Mapa Geológico que muestra la localización de las muestras analizadas con puntos rojos por microtomografía para realizar imágenes 3D.

Las muestras que se analizaron presentaron características similares en el tamaño de poro medio, sin embargo la distribución indicó que existen grandes poros de 150 y 500 nm para las muestras denominadas Tac16-03aAO y Tac16-22. Las imágenes en 3D presentadas para las diferentes muestras se refieren a la porosidad interconectada en color azul, en donde podemos observar el comportamiento de cada muestra (figura 62), los porcentajes de volumen de los poros varió entre 8.3 hasta el 2.5%, siendo el valor más alto corresponde a la muestra Tac16-03a y mínimo para la muestra Tac16-22 (tabla 2), la cual no presentó interconectividad en los poros a diferencia de las otras 3 muestras.

## Capítulo 5. Resultados

Tabla 2. Muestra los valores obtenidos de permeabilidad primaria para las muestras de Tacaná, en donde se obtuvieron datos de porcentajes de volumen de poro, tamaño de poro, y la permeabilidad en tres direcciones (x,y,z).

Muestra	Fracción en volumen de poros (%)	Tamaño de poro $d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	Permeabilidad dirección x ( $\text{m}^2$ )	Permeabilidad dirección y ( $\text{m}^2$ )	Permeabilidad dirección z ( $\text{m}^2$ )
Agua caliente	4.5	36	$1.45 \text{ E}^{-14}$	$6.06 \text{ E}^{-15}$	$5.35\text{E}^{-14}$
Tac16-03a	8.3	34	$4.01 \text{ E}^{-16}$	$2.38 \text{ E}^{-15}$	$6.33\text{E}^{-14}$
Tac16-03aA0	7.8	47	$1.59 \text{ E}^{-16}$	$1.43 \text{ E}^{-15}$	$5.62 \text{ E}^{-15}$
Tac16-22	2.5	72	0	0	0

Las simulaciones fueron llevadas a cabo en las 3 direcciones de la muestra, X, Y y Z, obteniendo valores más elevados para la dirección Z. Para la muestra de Agua caliente se obtuvo un valor de  $5.35\text{E}^{-14} \text{ m}^2$ , para la muestra Tac16-03a de  $6.33\text{E}^{-14}\text{m}^2$ , para la muestra Tac16-03aA0 de  $5.62 \text{ E}^{-15}\text{m}^2$ , y para la muestra Tac16-22 de 0 debido a la no conectividad de la porosidad. Los resultados son bajos comparados con la permeabilidad esperadas en pozos explotados actualmente lo que nos indica que la permeabilidad primaria tiene un aporte, sin embargo, el mayor aporte debe ser debido al fracturamiento de las rocas.



## Capítulo 5. Resultados

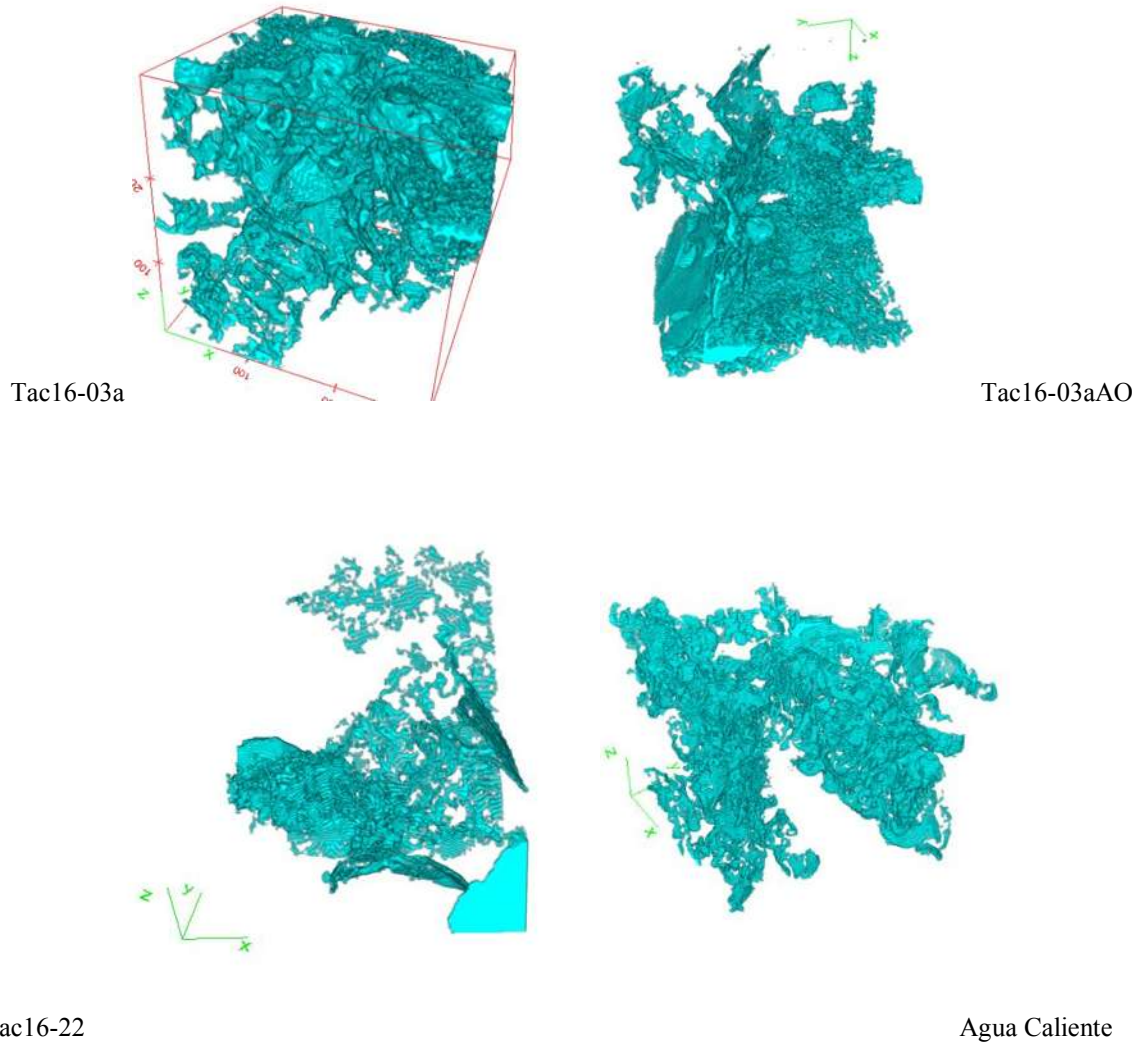


Figura 62. Simulación en 3D donde se muestra la interconexión de la porosidad en muestras con la ayuda de estudio de microtomografía.

## **Capítulo 6. Discusión y Conclusiones**

### **6. Discusión y Conclusiones**

Las zonas de falla pueden formar conductos para el flujo de los fluidos, si las redes de fracturas están abiertas en un macizo de roca. El mayor potencial del flujo puede ocurrir cuando las aperturas de las fracturas, la densidad y conectividad entre ellas sean mayores (Cox, Knackstedt y Braun, 2001; Sibson, 1996 en Gartrell et al, 2004). Alternativamente, las zonas de falla pueden formar barreras donde las zonas de falla son impermeables por la generación de gouge durante el proceso de cizalla o como el resultado de la cementación post deformación.

El éxito en la exploración de yacimientos geotérmicos radica en conocer las características físicas y mecánicas de los sistemas rocosos sometidos a un esfuerzo, las deformaciones pueden ser tanto dúctil o frágil las cuales dependen de la presión y la temperatura a las cuales son sometidas, en donde las fracturas son estructuras regularmente planares, las cuales permiten el paso de los fluidos a través de ellas. En los sistemas geotérmicos existen pocas bases de datos fuertes empíricas cualitativas y cuantitativamente para describir los escenarios más favorables en la actividad geotérmica.

En los sistemas geotérmicos es muy importante tener un control sobre estas estructuras, ya que nos aumentan la permeabilidad de las rocas y en algunos casos controlan la dirección de los fluidos. Cuando un yacimiento geotérmico se encuentra en rocas ígneas, la permeabilidad depende de factores secundarios de tipo tectónico debido a la baja porosidad y permeabilidad primaria de estas rocas. Dicha permeabilidad evoluciona por efectos de los esfuerzos tectónicos y térmicos, donde la deformación de tipo frágil y la concentración térmica en un punto, aumenta la permeabilidad, mientras que la expansión térmica, la deformación dúctil y la depositación química de minerales, tienden a sellar los conductos de las rocas. A temperaturas inferiores a 400-450 °C la roca se comporta de manera frágil generando fallas y fracturas, mientras que a mayores temperaturas se comporta de manera dúctil (González-Partida *et al.*, 2015).

El hecho de encontrar depósitos de sinter al NW de Tacaná en el poblado de Agua Caliente, sugiere que en el subsuelo se tienen un reservorio con temperaturas superiores a los 175°C (Olvera, 2017) y que estos se depositaron a partir de aguas meteóricas y magmáticas tipo

## **Capítulo 6. Discusión y Conclusiones**

HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Cl, con un Ph de aprox. 6 y una temperatura de 40 °C, los fluidos son considerados como una mezcla entre aguas magmáticas y meteóricas desde las partes altas del volcán hasta encontrar el depósito geotérmico principal, entre las rocas del basamento y los depósitos volcánicos, además que cuentan con la presencia de dos acuíferos semi-independientes que alimentan los manantiales termales al NO del edificio. Las temperaturas geotermométricas de Na-K son de 230 a 280 °C (Rouwet, 2006). Los depósitos volcánicos ligados a las fallas presentes, al NW se conservan permeables (Macías *et al.*, 2004 y García-Palomo *et al.*, 2006) los cuales podrían ser el conducto de los fluidos hasta los manantiales termales (Figura 63).

La interacción entre una placa oceánica subduciendo a dos placas continentales, en un margen transformante, el movimiento lateral induce el desplazamiento de la fosa y tiende a torcer el slap (McKenzie y Morgan, 1969, En: Authemayou *et al.*, 2011), si el Slap no se tuerce debido a su resistencia interna o porque está fuertemente unida al manto; entonces las placas continentales superpuestas deben acomodar la deformación (Authemayou, *et al.*, 2011).

El proceso de “Pull-up” consiste en retirar un bloque de la placa converge hacia la zona de subducción y desplazando este bloque hacia la parte superior que se retira (figura 64a paso a). El nuevo bloque está delimitado por la zona de subducción en un lado y por una nueva falla de deslizamiento en el otro lado (figura 64a, paso b). Se produce una rotación durante el movimiento del bloque para ajustar la dirección del bloque a la tendencia del límite transformante. Una serie de bloques se pueden generar sucesivamente a medida que se aumenta el desplazamiento lateral entre las placas que sobresalen y ayuda a reducir la torsión del slap. Los bloques de una placa se arrastran en la zona de transformación porque el retroceso de la placa crea un límite libre junta a la unión triple (figura 64 a).

## Capítulo 6. Discusión y Conclusiones

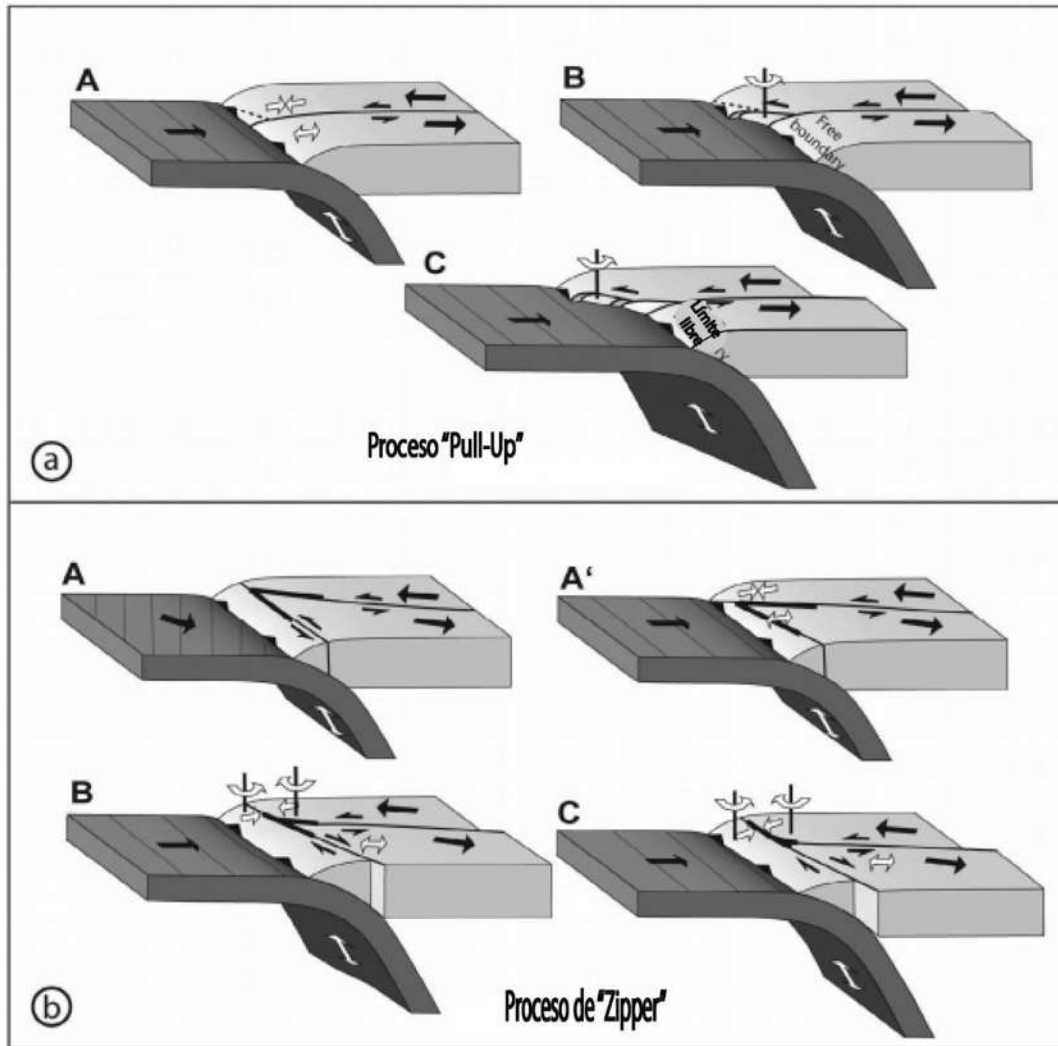


Figura 63. Modelos esquemáticos de la evolución cinemática entre las placas tectónicas (Norte América, Caribe y Cocos) al sur de México, donde a) proceso de “Pull-up” y b) Proceso de “Zipper”. Tomada de Authemayou, *et al.*, (2011).

El proceso de “Zipper” involucra un fore-arc (ante arco) roto, en donde puede ser generado por la división de deformación en la convergencia oblicua de la placa subducida en la placa superior (figura 64 b-A), a medida que el emplazamiento se amplifica de la capa superpuesta la parte superior debe girar en un eje vertical (etapa b figura 64 B). La rotación rígida de la ruptura de force-arc ocurre porque una parte es empujada hacia la fosa por la placa de escape. La placa superior convergente gira si el límite del desplazamiento lateral se transfiere al contacto del fore-arc.

## Capítulo 6. Discusión y Conclusiones

Tomando en cuenta los datos que se conocen sobre el yacimiento Geotérmico de Tacaná, esquematizamos los elementos que lo componen, destacando que se encuentra en un escenario estructural de cruce que fallas que cortan al aparato volcánico, las manifestaciones hidrotermales se muestran con puntos azules, que son alimentadas por 2 diferentes acuíferos mezclados de agua meteórica y magmática (Rouwet, 2006), y que pasan a través de los granitos fracturados sellados en las capas superficiales por productos volcánicos impermeables. En resumen, el fracturamiento de las rocas tiene mayor intensidad en la parte norte, en las cercanías del cruce de fallas regionales de tipo lateral izquierdo y la falla normal del río Coatán, las manifestaciones se localizan el NW sobre el basamento con capa sello volcánico, con una fuente de calor >4 km (figura 65). Poniendo al CVT como una alternativa viable para la generación de energía base a través de la geotermia al sur de México.

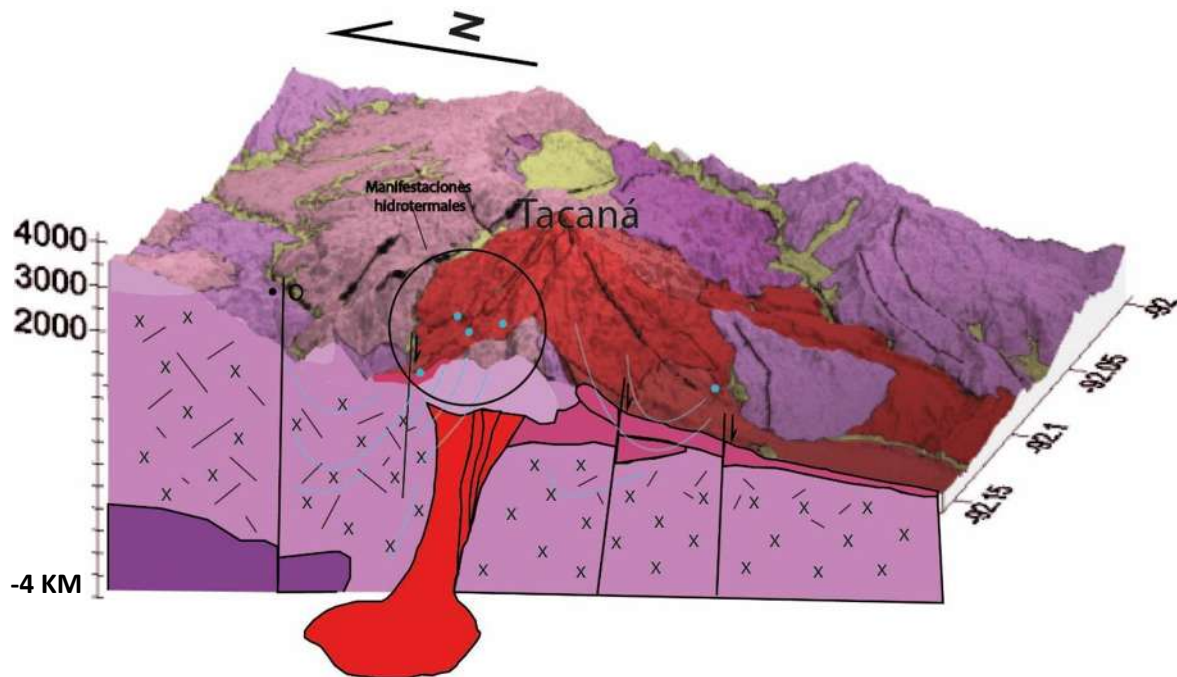


Figura 64. Corte esquemático N-S de lado Oeste del yacimiento geotérmico Tacaná, en donde se puede observar la interacción de las fallas con los flujos de los fluidos (mezcla geotérmica y meteórica). Con una fuente de calor aproximadamente a los 4 Km de profundidad, en un círculo negro se señalan las principales manifestaciones hidrotermales. Y las líneas negras corresponden a fallas de tipo lateral izquierdo y Fallas Normales. Nota. El corte es paralelo a la Falla Normal río Coatán.



## ***Capítulo 6. Discusión y Conclusiones***

### **6.1 Conclusiones**

El complejo volcánico Tacaná se encuentra en una intersección de Fallas regionales de tipo lateral Izquierdo al Norte, junto con fallas Normales de Dirección NE-SW, en donde se genera una zona de deformación intensa, con la presencia de permeabilidad secundaria al NW de edificio volcánico que ayuda a permitir el libre flujo de fluidos.

Una continua sismicidad se observa en la parte sur de México y Guatemala, ligado a grandes estructuras tectónicas como el sistema de fallas Polochic-Motagua, y a la Subducción de la placa de Cocos en donde los se pudieron identificar hipocentros someros de menos de 4 km.

Se pudieron hacer correlaciones en tiempo para los emplazamientos de los granitos-Granodioritas del basamento en 3 episodios, el Primero de 45.79-29 Ma. Con rocas preferentemente granodioritas, el segundo de 21.56-18.76 Ma. En donde las litologías son de rocas más ácidas que las anteriores con gran cantidad de cuarzos, (granitos), un tercero de 15.06-12.2 Ma. En rocas granodioritas y una intrusión hipabisal a los 4.56 Ma. Al NW con dirección NE-SW en aplitas.

Respecto al fracturamiento de las rocas, se identificaron zonas con poco fracturamiento, en donde la composición y densidad de las mismas, aunado al relleno de fracturas, no permitiría el libre flujo de los acuíferos. Por otro lado, en la parte NW, cercano al cruce de fallas, tanto el fracturamiento, como la alteración hidrotermal se encuentran intensos, con direcciones principales de NW-SE, NE-SW y N-S, en donde las fracturas NE serán las más relevantes para las los fluidos geotérmicos.

Los valores de permeabilidad primaria se realizaron con una resolución de 6  $\mu\text{m}$  en donde 3 muestras nos indica que existe conectividad entre los poros, aunque son bajos para los campos geotérmicos el mayor aporte de permeabilidad es debido al fracturamiento de las rocas.

## ***Capítulo 6. Discusión y Conclusiones***

Tacaná se encuentra en un régimen donde las fallas regionales claramente activas han generado fracturamiento en la zona, en donde las estructuras de cierre generadas por las componentes entre la falla Motagua y Jaltatagua, están controlando el escape de los gases hacia la superficie, con temperaturas medidas en el interior superiores a los 200 °C, dejando al Complejo volcánico como un campo con gran potencial geotérmico, así como de alto riesgo para una explosión efusiva del mismo.

El complejo volcánico Tacaná presenta tanto manifestaciones hidrotermales en superficie con temperaturas superiores a 175 °C, permeabilidad secundaria en las rocas, aporte de fluidos, meteóricos como de aguas magmáticas, ligado a zonas tectónicamente activas en donde el fracturamiento será nuestro principal conducto de fluidos. Siendo características ideales para la generación de energía geotérmica o usos directos.

## ***Bibliografía***

### **7. Bibliografía**

- Agosta F., Ruano P., Rustichelli A. (2012). Inner Structure and Deformation Mechanisms of Normal Faults in Conglomerates and Carbonate Grainstones (Granada Basin, Betic Cordillera, Spain): Inferences on Fault Permeability. *Journal of Structural Geology* 45, 4-20.
- Alcalde J., Bond C. E., Johnson G., Butler R. W., Cooper M. A., Ellis J. F. (2017). The Importance of Structural model availability on seismic interpretation. *Journal of Structural Geology*.
- Anderson E.M. (1951). The Dynamics of Faulting and dyke Formation with Application to Britain, secunde d. Oliver and Boyd. Edinburgh.
- Andreani L., Le Pichon X., Rangin C and Martínez-Reyes J. (2008). The Southern Mexico block: main boundaries and new estimation for its Quaternary motion. *Bulletin de la Societe Geologique de France*.
- Antonellini, M. A., Aydin, D.D. (1994). Microstructure of Deformation Bands in Porous Sandstones at Arche National Park, Utah. *Journal Structural Geology*. 16, 941-959.
- Authemayou C., Brocard G., Teyssier C., Simon-Labric T., Gutiérrez A., Chiquin E. Moran S. (2011). The Caribbean-North America-Cocos Triple Junction and the dynamics of the Polochic-Motagua fault systems: Pull-up and Zipper models. <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00609533>.
- Aydin, A. (2014). Failure Modes of Shales and their implications for natural and manmade fracture assemblages. In: Ferrill DA (ed) AAPG Bulletin Special Issue on Faulting and Fracturing in Shale and Self-Sourced Reservoirs.
- Babín Vich R. B., Gómez Ortiz D. (2010). Problemas de Geología Estructural 8. Fallas. Reduca (Geología). Series Geología Estructural. 2 (1): 124-147. Madrid, España.
- Backers and Moeck, (2015). FAULT TIPS AS FAVORABLE DRILLING TARGETS FOR GEOTHERMAL PROSPECTING – A FRACTURE MECHANICAL

## ***Bibliografía***

- PERSPECTIVE. Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Barton C., Zoback M and Moos D. (1995). Fluid flow along potencial active Faults in crystalline Rock. *Geology*, Departament of Geophysics, Stanford University, Stanford, California v. 23 No. 8; 683-686.
- Barton Colleen, M. D., Zoback M. (1997 b). In-Situ Strees Measurements Can Help Define Local Variations In Fracture Hydraulic Conductivity At Shallow Depth. *The Leading Edge*. Geomechanics International. Palo Alto, California.
- Buform E. (1994). Métodos para la Determinación del Mecanismo Focal de los Terremotos. Methods for estimation of focal mechanism of earthquakes. *Física de la Tierra*, Num 6. 113-139. Dpto. del Geofísica, Universidad Complutense, Madrid.
- Burkart B. (1983) Neogene North American-Caribbean plate boundary across Northern Central America; Offset along the Polochic Fault. *Tectonophysics* 99:251–270.
- Caine Jonathan, Evans James, Forster Craig, (1996). Fault Zone Architecture And Permeability Structure. *Geology*; v. 24; no. 11; p. 1025–1028. Department of Geology and Geophysics, University of Utah, Salt Lake City, Utah 84112.
- Carfantan J. Ch. (1976). El Prolongamiento del Sistema de Fallas Polochic-Motagua en el sureste de México; una frontera entre dos provincias geológicas: Acapulco (México), Congreso Latinoan. *Geología*, 3.
- Carfatan J.C. (1981). Evolución Estructural del Sureste de México; Paleogeografía e Historia Tectónica de las Zonas Internas Mesozoicas. *Revista* vol 5 núm. 2 p. 207-216. Instituto de Geología. UNAM.
- Cilona, A. Aydin, A., Johnson N. M. (2015). Permeability of a fault zone crosscutting a sequence of sandstones and shales and its influence on Hydraulic Hea Distribution in the Chatsworth Formation, California, USA. *Hydrogeology Journal* 23: 405-419.
- Collard N., Taran Y., Peiffer L., Campio R., Jacome Paz M. P. (2014). Solute fluxes andGeothermal Potencial of Tacaná Volcano-ydrthermal System, Mexico-Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 228 123-131.

## ***Bibliografía***

- Cotler Ávalos H. (2010). Las cuencas Hidrográficas de México Diagnóstico y Priorización. Pluralia Ediciones e Impresiones S.A de C.V. Coyoacán, México.
- Crider J. G. and Peacock D. C. P. (2004). Initiation of brittle faults in the upper crust: a review of field observations. *Journal of Structural Geology*. 26, 4. P. 691-707.
- Curewitz D., and Karson J. A. (1997). Structural Settings of Hydrothermal Outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 79, 3-4. P. 149-168
- Damon P., Montesinos E. (1978). Late Cenozoic volcanism and metallogenesis over an active Benioff Zone in Chiapas, Mexico. *Arizona Geological Society Digest* 11:155–168.
- De la Cruz, V., Hernández, R. (1985). Estudio geológico de la zona geotérmica del volcán de Tacaná, Chiapas. Informe 41/85, departamento de exploración, CFE.
- De la Cruz-Reyna, S., Armienta, M.A., Zamora, V., Juárez, F. (1989). Chemical changes in spring waters at Tacaná volcano, Chiapas, Mexico: A possible precursor of the May 1986 seismic crisis and phreatic explosion. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 38, 3–4, P. 345-353.
- Dollfus A., De Montserrat E. (1868). Voyage Geologique dans Les Republiques de Guetemala et de Salvador Geological Magazine, 6, 64. P. 455-459. Cambridge University.
- Donnelly TW, Horne GS, Finch RC, López-Ramos E (1990) Northern Central America; the Maya and Chortis blocks. In: Dengo G, Case JE (eds) The geology of North America, vol H. The Caribbean region. Geological Society of America, Boulder, pp 37–76.
- Fagundo-Castillo J. R., Monteagudo-Zamaora V., Rodríguez-Piña M., Leonarte Pérez T., González Hernández P., Suárez Muñoz M., Melián Rodríguez C., Abraham Alonso A. (2007). Geoquímica de las Aguas Subterráneas que drenan Carbonatos del Intervalo Jurásico-Paleógeno. Geociencias. Habana, Cuba.
- Faulds J. E., Hinz, Coolbaugh, Cashman, Kratt, Dering, Edwards, Mayhew, and McLachlan, (2011). ASSESSMENT OF FAVORABLE STRUCTURAL SETTINGS OF



## ***Bibliografía***

- GEOHERMAL SYSTEMS IN THE GREAT BASIN, WESTERN USA. *Geothermal Resources Council Transactions*, 35, 777-783.
- Faulds J.E., Hinz N. H., Krenener C. and Coolbaugh M. F. (2012). Regional patterns of geothermal activity in the Great Basin region, western USA: Correlation with strain rates: *Geothermal Resources Council Transactions*, 36 P. 897-902.
- Faulds J. E. and Hinz N., H. (2015) Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for Discovering Blind Geothermal Systems. *World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, P.19-25.
- Faulker D.R., Jackson, R.J., Lunn, R.W., Shlische D., Shipton, C.A.J., Wibberley, M.O., Withjack, (2010). A Review of Recent Developments Concerning The Structure, Mechanics and Fluid Flow Properties of Fault Zones. *Journal of Structural Geology* 32 1557e1575. Department of Earth and Ocean Sciences, University of Liverpool, Liverpool, UK.
- Fossen H., Rotevatn A. (2013). Fault linkage and relay structures in extensional settings- A review. *Earth-Science Reviews*, 154 P. 14-28.
- Franco A., Lasserre C., Lyon-Caen H., Kostoglodov V., Molina E., Guzman-Speziale M., Monterosso D., Robles V., Figueroa C., Amaya W., Barrier E., Chiquin L., Moran S., Flores O., Romero J., Santiago J. Manea M. y Manea V. C. (2012). Fault kinematics in northern Central America and coupling along the subduction interface of the cocos Plate, from GPS data in Chiapas (Mexico), Guatemala and El Salvador. *Geophysical Journal International*, 189(3), 12223-1236.
- Garduño-Monroy V.H., Macias J.L. and Molina Garza R.S. (2015). Geodynamic Setting and Pre-volcanic Geology of Active Volcanism in Chiapas. In *Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná* P. 1-23. Springer Berlin Heidelberg.
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Mora, J.L., Hughes S., Saucedo, R., Espindola, J.M., Escobar, R. Layer, P. (2006). Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. *Geological Society Americana*, Special paper 412, 39-57.

## ***Bibliografía***

- Gartrell A., Zhang Y., Lisk M., Dewhurst D. (2004). Fault intersections as critical hydrocarbon leakage zones: integrated field study and numerical modelling of an example from the Timor Sea, Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 21(9) P. 1165-1179.
- Glassley W. E., (2014). Renewable Energy and the Environment. Geothermal Energy. Second Edition. CRC Press. Boca Raton.
- Larson E. (2015). Global CMT Catalog Search. Consultada en: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Goldstein B. Hiriart G., Tester J., Gutierrez-negrín L., Bertani R., Bromley C., Huenges E., Ragnarsson A., Mongillo M. (2012). Geothermal Energy, Nature, Use, and Expectations. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* P. 4190-4201.
- González-González, M. s.f. GEOTERMIA COMO ALTERNATIVA ENERGÉTICA EN MÉXICO ¿ES REALMENTE VIABLE?,
- González-Partida E., González-Ruiz L.M. (2015). Generalidades de la Energía Geotermica y su estado Actual en México. Geología, Minería y Consultoría (GEOMINCO S.A. de C.V.)
- Gutiérrez-Negrín L. C.A. (2015). Mexican Geothermal Plays. In *Proceedings of the world geothermal congress 2015*, Melbourne, Australia, 19-25 April.
- Guzmán-Speziale M, Pennington WD, Matumoto T. (1989). The triple junction of the North America, Cocos, and Caribbean Plates: *Seismicity and tectonics. Tectonics* 8:981–999.
- Guzmán -Speziale M. (2001). Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary. *Tectonophysics* 337(1) 39-51.
- Guzmán-Speziale M., Valdés-González C., Molina E., Martín-Gómez J. (2005). Seismic activity along the Central America volcanic arc: Is it related to subduction of the Cocos plate?. *Tectonophysics* 400 (1), 241-254.

## ***Bibliografía***

- Guzmán -Speziale, M. (2010). Beyond the Motagua and Polochic faults: Active strike-slip faulting along the Western North America–Caribbean plate boundary zone. *Tectonophysics*, 496, 1-4, P. 17-27.
- Guzmán-Speziale M., Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2011). GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA ISSN 0186-5897, 24 (1) CFE.
- HATCHER, R. (1995). Structural Geology. Principles, Concepts and Problems. *Macmillan Publishing Company*.
- Hiriart- Le Bert, G. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.
- Hodson C. J. (1989). The Structure of Shear-Related, Vein-Type Gold Deposits: A Review. *Ore Geology Reviews*,4(3), 231-273.
- INEGI. (2008). Prontuario de información geográfico municipal de los Estados Unidos Mexicanos Tapachula, Chiapas. Clave geoestadística 07089. Consultado el 16/04/2017 en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/07/07089.pdf>
- Lyon-Caen H, Barrier E, Lasserre C, Franco A, Arzu I, Chiquin L, Chiquin M, Duquesnoy T, Flores O, Galicia O, Luna J, Molina E, Porras O, Requena J, Robles V, Romero J, Wolf R (2006). Kinematics of the North American Caribbean-Cocos plates in Central America from new GPS measurements across the Polochic-Motagua fault system. *Geophys Research Letters*, 33:1–5
- Macías, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., Scott, K. M., Huges, S. y Mora, J. C. (2000). Late Holocene Peléan-style eruption at Tacaná volcano, Mexico and Guatemala: Past, present and future hazards. *Geological Society of America Bulletin*, 112(8), 1234-1249.
- Macías, J.L. (2006). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (57 (3), 379-424.

## ***Bibliografía***

- Macías, J.L., Arce, J.L., García-Palomo, A., Mora, J.L., Layer, P.W., Espínola, J.M. (2010). Late-Pleistocene flank collapse triggered by dome growth at Tacaná volcano, México-Guatemala, and its relationship to the regional stress regime. *Bulletin of Volcanology*, 72(1), 33-53.
- Macías J.L., Arce J.L., Layer P.W., Saucedo R., and Mora J.C. (2015). Eruptive History of Tacaná Volcanic Complex. *In Active Volcanoes of Chiapas (Mexico): El Chichón and Tacaná*, 115-138. Springer Berlin Heidelberg.
- Marrero Díaz R. (2010). Modelo Hidrogeoquímico Del Acuífero De Las Cañadas del Teide, Tenerife, Islas Canarias. Tesis Doctoral remitida para el grado de Doctor en la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
- Mercado, R., Rose, W. I. (1992). Reconocimiento Geológico y evaluación preliminar de peligrosidad del volcán Tacaná, Guatemala/ México. *Geofísica Internacional*, 31, 205-237.
- Moek I S., (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882.
- Mora, J.C., Jaimes-Viera, M.C., Garduño-Monroy, V.H., Layer, P.W., Pompa-Mera, V., Godínez, M.L. (2007). Geology and geochemistry characteristics of the Chiapanecan Volcanic Arc (Central Area), Chiapas Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 162, 1–2, P. 43-72.
- Mora, J. C., Gardner, J. E., Macías, J.L., Meriggi, L., Santo, A. P. (2013). Magmatic controls on eruption dynamics of the 1950 yr B.P. eruption of San Antonio Volcano, Tacaná Volcanic Complex, Mexico–Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 262, 134-152.
- Cabrejo, O. J. G., y Sánchez, G. M. (2006). Caracterización de patrones de fracturamiento mediante ventanas circulares y análisis fractal. *Geología Colombiana*, 31, 73-104, 21.
- Mujica R. (1987). Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el Macizo de Chiapas: México, Instituto Mexicano del Petróleo. Informe interno C-2009:47

## ***Bibliografía***

- Mülleried, F. K. G. (1951). La reciente actividad del Volcán Tacaná, estado de Chiapas, a finales de 1949 y principios de 1950. Informe del Instituto de Geología de la UNAM, 28.
- Olvera-García E., Nájera-Blas S. M., Garduño-Monroy V. H. (2016). Revisión de los escenarios estructurales favorables para la ubicación de un sistema geotérmico y su aplicación a casos de estudio. *Memorias del XXIII Congreso Anual Asociación Geotérmica Mexicana*.
- Olvera-García E. (2017). Estudio de geología estructural, mineralógico y litofacies de los depósitos hidrotermales de San Agustín del Maíz e Ixtlan de Los Hervores, Michoacán: Enfocado a la Exploración Geotérmica. Tesis para obtener el Grado de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. INICIT, UMSNH, Morelia, Michoacan.
- Ortega-Gutiérrez F., Mitre S., Roldan-Quintana, J., Aranda-Gómez, J.J., Morán-Zenteno, D., Alaniz-Alvares, S. A., Nieto-Samaniego A. F. (1992). Carta Geológica de la República mexicana Escala 1:2,000,000. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología y Consejo de Recursos Minerales. México D.F.
- Pandarínath K. s. f. Características químicas y geotermométricas de fluidos geotérmicos. Coordinación de Geoenergía
- Petit J. P. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. Laboratoire de Tectonique, Université de Montpellier. Montpellier cedex. France.
- Quijano León J. L. (2007). Manual de Geotermia. Ciencias de la Tierra e Ingeniería de Reservorios.
- Rouwet D., Taran Y, Inguaggiato S, Varley N. (2004). Hydrothermal activity at Tacaná 719 volcano, Mexico-Guatemala. WRI-11, Wany and Seal II (eds), Taylor and Francis 720: 173-176.
- Rouwet D. (2006). Estudio Geoquímico comparativo de los sistemas hidrotermales de los volcanes activos en Chiapas: El Chichón y Tacaná. Tesis Doctoral por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Rouwet D., Inguaggiato S., Taran Y., Varley N., Santiago S. J. A. (2009). Chemical and Isotopic Compositions of Thermal Springs, Fumalores and Bubbling Gases at



## ***Bibliografía***

- Tacaná Volcano (Mexico-Guatemala): Implications for Volcanic Surveillance. *Bulletin of Volcanology*, 71(1), 319-335.
- Sanderson D.J. and Zhang X. (1999). Critical Stress Location of Flow Associated with Deformation of Well-fractured Rock Masses, with Implications for Mineral Deposits. Geological Society, London, Special Publications, 155, 69-81.
- Santoyo E., Barragán-Reyes, R.M. (2010), Energía geotérmica. En: Volumen Especial sobre Energías Alternativas (abril-junio 2010) *Ciencia, Revista de la Academia Mexicana de Ciencias*, 61(2), 40-51.
- Sapper, C. (1896). La geografía física y la geografía de la Península de Yucatán: Instituto Geológico de México, 3, 58, 6 láms.
- Sapper, K. (1899). Ueper Gebirgsbau und Boden des noerdlichen Mittelamerika: *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 127, 119.
- Tasillas Requelme E. L. (2011). Análisis para aprovechar la energía geotérmica de las aguas termales de baños del Inca para la generación de energía eléctrica para sistemas de pequeña potencia. Tesis para obtener el grado de Licenciatura. Universidad Alas Peruanas. Facultad de Ingenierías y Arquitecturas. Cajamarca, Perú.
- Toth J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*. 111 (4), 9-26.
- Trudgill B., and Cartwright, J. (1994). Relay-ramp forms and normal-fault linkages, Canyonlands National Park, Utah. *Geological Society America Bulletin*, 106(9), 1143-1157.
- Truesdell, A.H., and Lippmann M.J. (1990). Beneficial Effects of Groundwater Entry into Liquid-Dominated Geothermal Systems. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, 14, 721-727.
- Twiss, R. J., & Moores, E. M. (1992). *Structural geology*. Macmillan. Walsh J.J, Bailey W.R., Childs C., Nicol A., Bonson C., (2003). Formación de segmented normal faults: a 3-D perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(8), 1251-1262.
- Whash J.J., Barley W.R., Childs C., Nicol A., Bonson C.G. (2003). Formation of Segmented normal faults: a 3-D Perspective. *Journal of Structural Geology*, 25(1), 1251-1262.

## ***Bibliografía***

- Weber B, Cameron KL, Osorio M, Schaaf P. (2005). A Late Permian tectonothermal event in Grenville crust of the southern Maya Terrane; UPb zircon ages from the Chiapas Massif, southeastern Mexico. *International Geology Review*, 47(5), 509–529.
- Weber B., Iriondo A., Premo W.R., Hecht L., Schaaf P. (2007). New insights into the history and origin of the southern Maya block, SE México: U-Pb–SHRIMP zircon geochronology from metamorphic rocks of the Chiapas massif. *International Journal Earth Sciences* 96(2),253–269.
- Williams C.F., Reed M.J., Anderson A.F. (2011). Updating the classification of geothermal resources. In *Proceedings 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.