



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE  
HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE  
LA TIERRA**

**Maestría en Geociencias y Planificación Del  
Territorio**

**TESIS**

**Evolución del campo de esfuerzos y la génesis de la  
mineralogía, formada en las distintas fases del  
fallamiento, en las rocas de los yacimientos  
geotérmicos del Lago de Cuitzeo, México.**

Que para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias**

Con especialidad en:

**Geociencias y Planificación del Territorio**

**P R E S E N T A:**

**Addí Emanuel Maciel Rivera**

Director de Tesis: Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy

Co-director de tesis: Dr. Mikhail Ostroomov

Morelia, Michoacán, Agosto 2018.

## Índice

Índice de figuras.....	VI
Índice de tablas.....	XIII
Nomenclaturas y abreviaturas.....	XIV
Resumen.....	XVI
Abstract.....	XVII
Capítulo I. Introducción.....	1
Capítulo II. Generalidades.....	4
II.I.- Planteamiento del problema.....	4
II.II.- Objetivos.....	5
II.III.- Zona de estudio.....	6
Capítulo III.- Estado del arte.....	8
III.I.- Estudios de estratigrafía de las secuencias lacustres.....	8
III.II.- Estudios de Geología Estructural y Vulcanología.....	8
III.III.- Estudios con un enfoque geotérmico.....	9
III.IV.- Estudios de impacto ambiental y características del acuífero.....	10
III.V.- Estudios relacionados con el tema de investigación.....	11
Capítulo IV. Marco Tectónico.....	16
Capítulo V. Marco Teórico.....	19
V.I.-Geotermia en México.....	19
V.II.- Control estructural del fluido geotérmico.....	20

V.III.- Difracción de rayos X.....	22
V.IV.- Espectroscopía Infrarroja.....	23
V.V.- Microscopía Electrónica de Barrido.....	23
V.VI.- Microtomografía de Rayos X.....	24
Capítulo VI. Metodología y equipo.....	25
VI.I.- Gabinete.....	25
VI.II.- Muestras.....	27
VI.II.I.- Muestreo.....	27
VI.II.II.- Preparación de muestras para DRX.....	31
VI.II.III.- Preparación de muestras para EIR.....	33
VI.II.IV.- Preparación de muestras para Microscopía electrónica de barrido.....	34
VI.II.V.- Preparación de muestras para Microtomografía.....	35
VI.III.- Equipo.....	36
Capítulo VII. Resultados.....	39
VII.I.- Geología.....	39
VII.II.- Estructural.....	44
VII.III.- Mineralogía.....	55
VII.III.I.- Análisis de la mineralogía por familia de fallas y regiones.....	59
VII.III.II. Microscopia Electrónica de barrido.....	67
VII.III.III. Microtomografía.....	74

Capítulo VIII. Discusión.....	81
Capítulo IX. Conclusiones.....	84
Referencias.....	86
Anexos.....	92

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco en primer lugar al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy por sus enseñanzas, paciencia y sobre todo su motivación que han sido fundamentales en mi formación y la elaboración de este trabajo.

Al Dr. Mikhail Ostrooumov, por sus enseñanzas y su apoyo durante mi formación académica y en la elaboración del presente trabajo.

También quiero agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, el Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra y a la Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. De igual manera agradezco a mis profesores ya que han sido ellos quienes me han guiado y motivado durante mi estancia en dicha institución.

Al proyecto No. 17 del Centro Mexicano de Innovación Energía Geotérmica (CeMIEGeo) "ESTUDIO DE FRACTURAMIENTO-FALLAMIENTO Y CAMPO DE DEFORMACIÓN ACTUAL, APOYADOS CON SÍSMICA Y TOMOGRAFÍA EN LOS CAMPOS GEOTÉRMICOS DE CUITZEO, MICH., RANCHO NUEVO, GTO., LAS DERRUMBADAS, PUE., Y VOLCÁN TACANÁ, CHIAPAS"; por su apoyo económico y la oportunidad de ser parte de este gran proyecto.

A mi familia por brindarme en todo momento su apoyo, en especial a mis padres Valentina Rivera Espinoza y Froylán Ramón Maciel Peña ya que ellos han sido el motor fundamental en mi formación como ser humano.

A mi esposa Ana Victoria Rentería Ortega, que ha sido mi apoyo y motivación en todo momento, viviendo esta gran etapa a mi lado. Gracias por estar siempre acompañándome, por tu magnifico amor y por ser mi compañera de vida.

A mis compañeros y amigos del grupo de trabajo Cemie-Geo gracias por el apoyo y las enseñanzas, que han sido fundamentales para lograr este objetivo.

Por último y no menos importante agradezco a CONACyT por la beca de maestría otorgada y sin la cual esta investigación no habría sido posible.

PARA:

MI ESPOSA ANA VICTORIA Y MI FAMILIA

## Índice de figuras

Figura II.1. Modelo digital de elevaciones en el que se muestra la localización de la zona de estudio (recuadro azul), así como la localización de las 4 zonas geotérmicas presentes en el área, marcadas con los círculos rojos, de izquierda a derecha son Chucándiro (CH), San Agustín del Maíz (SAM), San Agustín del Pulque (SAP) y Araró (AR).....	6
Figura III.1. Imagen de los tipos de las interacciones Falla-Falla descritas por Triip <i>et all</i> , 2004.....	12
Figura III.2. Imagen de los tipos de microfracturas estudiadas por Mazoguchi, 2013.....	13
Figura III.3 Imagen de las microfracturas en diferentes muestras minerales analizadas por Anders, 2014.....	14
Figura IV.1 Principales sistemas de estructuras presentes en la parte central del Cinturón Volcánico TransMexicano. Sistema de Fallas Morelia-Acambay ENE-WSW y el sistema heredado del Basing and Range-NW-SE (Tomado de Garduño-Monroy et al., 2009), se enmarca la zona de estudio en el recuadro rojo.....	18
Figura V.1 En la imagen se muestra el potencial geotermoeléctrico conjunto estimado en 20 zonas geotérmicas en actual exploración (Hiriart et al, 2011).....	20
Figura V.2. Esquema donde se representan la interacción de esfuerzo máximo y esfuerzo mínimo respecto a estructuras geológicas y fallas.....	21
Figura VI.1. En la figura de arriba se muestra el espacio de trabajo de los software Arc Gis V.10.3 (izquierda) y Global Mapper V. 16 (derecha). Utilizados durante el trabajo de gabinete.....	26
Figura VI.2. En la figura se muestra un ejemplo de la cartografía de fallas generada con imágenes de satélite y bibliografía previa para el sector suroeste del área de estudio (parte inferior), se muestran también algunos resultados importantes de trabajos con los se generó esta información	

(parte superior, de izquierda a derecha, Trujillo-Hernández 2016, Mennella 2011, y Medina-Vega 2008).....	<b>27</b>
Figura VI.3. En la figura se muestran fotografías sobre el desarrollo del trabajo en campo en el que se identificaron las estructuras de falla principales a nivel de afloramiento y se identifican las que se encontraran mineralizadas y con indicadores cinemáticos.....	<b>28</b>
Figura VI.4. En la figura se muestran fotografías del levantamiento estructural en campo y ejemplos de los datos levantados sobre la descripción de estaciones generadas.....	<b>29</b>
Figura VI.5. En la figura se muestran fotografías del marcado de estructuras antes del muestreo, así como el almacenamiento de las mismas.....	<b>30</b>
Figura VI.6. En la figura se muestran fotografías del método de limpieza y selección de muestra mediante el corte de la muestra con un disco de corte con polvo de diamante.....	<b>31</b>
Figura VI.7. En la figura se muestran fotografías del montaje de muestra en el molino mecánico de ágata (superior izquierda), el mortero de ágata para molienda manual (superior derecha) y las muestras ya molidas y listas para el montaje en los portamuestras redondos de vidrio para difractometro.....	<b>32</b>
Figura VI.8. En la figura se muestran fotografías del método de montaje de la muestra para el análisis de DRX, en el que se toma una porción de la muestra para cubrir en su totalidad el espacio central del portamuestra, generando una superficie plana con ayuda de un portamuestra rectangular para microscopio.....	<b>33</b>
Figura VI.9. En la figura se muestran fotografías del montado de la muestra y el acomodo en el equipo de análisis de Espectroscopia Infrarroja.....	<b>34</b>
Figura VI.10. En la figura se muestran fotografías del cortado de la muestra (derecha) y el montaje de las muestras en el porta-muestras para llevar a cabo la metalización de las mismas y poder realizar el análisis.....	<b>34</b>



- Figura VI.11. En la figura se muestran fotografías de la superficie de una muestra vista con la lupa petrográfica (izquierda) y las muestras ya cortadas y secas, listas para que el técnico pueda llevar a cabo el montaje en los portamuestras para el microtomógrafo.....**35**
- Figura VI.12. En la figura se muestran el equipo Difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance (izquierda) y el Espectrómetro de Infrarrojo de la compañía Agilent technologies modelo Cary 630 FTIR (derecha) ambos utilizados durante los análisis de laboratorio, para la determinación de las especies minerales.....**37**
- Figura VI.13. En la figura se muestran el equipo microscopio de barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F FEG-SEM (izquierda) y el nanotomograma de rayos X Multiscale Skyscan 2211.....**38**
- Figura VII.1. Mapa Geológico de la zona de estudio. (Pasquare et al, 1991, Rentería-Ortega, 2015. Maciel-Rivera, 2015, Trujillo-Hernández 2016).**43**
- Figura VII.2. Mapa estructural de la zona de estudio en el que se identifican las principales estructuras geológicas que se localizaron en el área así como los diagramas rosa correspondientes a las cinco regiones de muestreo en que se dividió la zona: Región Suroeste de color verde, Región Oeste de color azul marino, Región Centro de color amarillo, región Norte de color azul cielo y por último la Región Este de color naranja.....**44**
- Figura VII.3. En la imagen de la derecha se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla Tarímbaro y las fallas N-S que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.....**45**
- Figura VII.4. En la izquierda se muestra una fotografía de los planos muestreados en la Falla Tarímbaro, en el punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-4 (Fig. VIII.4), en los cuales se observa el cruce entre las estructuras Norte-Sur y las Noreste-Suroeste, ambas con rellenos minerales en los que se conservaron indicadores cinemáticos. En la derecha se muestra una fotografía del plano de falla en la que se observan estrías horizontales que evidencian el movimiento lateral de la falla.....**46**

Figura VII.5. Perfil geológico estructural en que se muestran las principales fallas en el Región Suroeste así como su relación con las fallas de la Región Oeste y puntos de muestreo.....	<b>46</b>
Figura VII.6. En la imagen de la derecha se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla la Yerbabuena y las fallas N-S que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.....	<b>47</b>
Figura VII.7. En la imagen de la izquierda se observa una de las fallas Norte-Sur que pone en contacto un depósito de lavas con composición andesítica y un deposito ignimbrítico correspondiente al punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-13 (Fig. VII.2). Del lado derecho se observa un plano de falla con depósitos minerales en su superficie y el cual tiene una dirección preferencial Este-Oeste Correspondiente al punto de muestreo Cuit-fall-14 (Fig. VII.5).....	<b>48</b>
Figura VII.8. Perfil geológico-estructural en el que se muestra un corte transversal de la zona perteneciente a la Región Oeste, así como sus principales estructuras de falla y puntos de muestreo.....	<b>48</b>
Figura VII.9. En la imagen de la derecha se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla San Agustín del Maíz y las fallas que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.....	<b>49</b>
Figura VII. 10. Imágenes de los puntos de muestreo etiquetados como Cuit-fall-27 (izquierda) y Cuit-fall-37 (derecha).....	<b>50</b>
Figura VII.11. Perfil geológico-estructural en el que se muestra un corte de dirección Norte-Sur, en el cual cruzan las fallas Tarímbaro al Sur y la falla La Yerbabuena y la Falla San Agustín del Maíz, con el campo geotérmico del mismo nombre.....	<b>50</b>
Figura VII.12. En la imagen de la derecha se observa un estereograma generado con los datos estructurales del punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-29. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.....	<b>51</b>

Figura VII.13. En la imagen de la izquierda se muestra el afloramiento del punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-29, así mismo en la imagen de la derecha se observa un acercamiento a las fracturas rellenas en esta zona.....	<b>52</b>
Figura VII.14. Se muestra en la imagen un perfil Geológico-estructural en el que se destacan la presencia de la Falla Puerto de Cabras Y la Falla el Naranja que constituyen la porción Sur y Norte respectivamente del denominado Horst de Santa Ana Maya que conforma el limite Norte del Garben de Cuitzeo.....	<b>52</b>
Figura VII.15. En la imagen de la derecha se observa un estereograma generado con los datos estructurales del Graben de Araró. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.....	<b>53</b>
Figura VII.16. En las imágenes se muestra el punto de muestreo con la etiqueta nombrada Cuit-Fall-3, en la izquierda se observa el afloramiento principal con una fractura rellena y a la derecha un acercamiento a los minerales secundarios muestreados.....	<b>54</b>
Figura VII.17. Se muestra en la imagen un perfil geológico-estructural con un corte Norte-Sur, en el cual se muestra la distribución de las principales fallas en el Sector Este de la zona de estudio así como la localización de algunos puntos de muestreo en la región.....	<b>54</b>
Figura VII.18. Mapa geológico-estructural de la zona de estudio, en el cual se observa la localización de los puntos de muestreo generados durante la campaña de trabajo de campo.....	<b>58</b>
Figura VII. 19. Imágenes de los puntos de muestreo Cuit-Fall-3 (derecha) y Cuit-Fall-7 (izquierda).....	<b>59</b>
Figura VII. 20. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall- 40 (izquierda) y Cuit-Fall-9 (derecha).....	<b>60</b>
Figura VII. 21. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-14 (izquierda) y Cuit-Fall-22 (derecha).....	<b>61</b>

Figura VII. 22. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-10 (izquierda) y Cuit-Fall-1 (derecha).....	<b>63</b>
Figura VII. 23. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-11 (izquierda) y Cuit-Fall-23 (derecha).....	<b>64</b>
Figura VII. 24. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-43 (izquierda) y Cuit-Fall-42 (derecha).....	<b>65</b>
Figura VII.25. En la izquierda se observa una imagen de las muestras sometidas al microscopio electrónico de barrido, la muestra 1 corresponde al punto Cuit-Fall-3, la 2 a Cuit-Fall-22, la 3 a Cuit-Fall-21, la 4 a Cuit-Fall-23. En la imagen de la derecha se observa una imagen de la superficie de la muestra 2, obtenida con una lupa petrográfica y en la cual se logran apreciar las estrías presentes en la muestra.....	<b>67</b>
Figura VII.26. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X270, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X10,000 en la muestra Cuit-Fall-3.....	<b>69</b>
Figura VII.27. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X500, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-22.....	<b>70</b>
Figura VII.28. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X250, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-21.....	<b>72</b>
Figura VII.29. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X250, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-23.....	<b>73</b>
Figura VII.30. Corte lateral de la muestra Cuit-Fall-18, en el cual se aprecia el cambio de la coloración y de textura en el mineral de las partes más externas hacia la parte interna; la flecha indica la dirección de la cima de la muestra.....	<b>75</b>
Figura VII.31. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-18.....	<b>76</b>

Figura VII.32. Se muestra en la imagen un corte lateral de la muestra Cuit-Fall-30, en el que se evidencian las tres fases de depósitos minerales por los que paso la estructura hasta ser aparentemente sellada por estos minerales neoformados. La flecha indica la cima de la muestra, al momento de ser recolectada en campo.....	<b>77</b>
Figura VII.33. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-30....	<b>78</b>
Figura VII.34. Imagen del corte lateral del depósito geotérmico perteneciente a la muestra Cuit-Fall-43, se observa la forma de depósito caótico en comparación con las muestras de fallas y fracturas. La flecha indica la cima de la muestra al ser recolectada en campo.....	<b>79</b>
Figura VII.35. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-43....	<b>80</b>
Figura VIII.1. Se muestra un perfil geológico-estructural en que se observa la localización de las muestras más cercanas a los campos geotérmicos de San Agustín de Maíz (Cuit-Fall-42) y San Agustín del pulque (Cuit-Fall-24).....	<b>82</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Se muestran los datos de las etiquetas generadas en los diferentes puntos de muestreo, con su localización geográfica, localidades cercanas a la zona y datos estructurales de las mismas.....	<b>56</b>
Tabla 2. Se muestran los datos de las etiquetas generadas en los diferentes puntos de muestreo, con su localización geográfica, localidades cercanas a la zona y datos estructurales de las mismas.....	<b>57</b>
Tabla 3. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo normal.....	<b>60</b>
Tabla 4. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo lateral derecho.....	<b>61</b>
Tabla 5. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo lateral izquierdo.....	<b>62</b>
Tabla 6. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de fracturas rellenas con minerales neoformados.....	<b>63</b>
Tabla 7. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en zonas con presencia de alta alteración hidrotermal.....	<b>65</b>
Tabla 8. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas los denominados depósitos recientes.....	<b>66</b>

## **Nomenclaturas y abreviaturas**

µm: Micrómetros

3D: Tres dimensiones.

°C: Grados centígrados.

AR: Araró.

CeMie-geo: Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica.

CFE: Comisión Federal de Electricidad.

CH: Chucándiro.

Cuit-Fall: Nomenclatura asignada a las los puntos de muestreo y muestras recolectadas en campo.

CVTM: Cinturón Volcánico Trans-Mexicano.

DRX: Difracción de Rayos X.

E: Punto cardinal Este.

EIR: Espectroscopia Infrarroja.

Etc: abreviatura de la palabra etcétera.

Fig: Abreviatura de la palabra figura.

GPG: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad.

GPS: Abreviatura en ingles de los sistemas de posicionamiento global.

Gto: Guanajuato.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

m: Metros.

MEB: Microscopio Electrónico de Barrido.

MW: Megawatts.

N: Dirección cardinal Norte.

NE: Dirección localizada entre los puntos cardinales Norte y Este.

nm: Nanómetros.

NW: Dirección localizada entre los puntos cardinales Norte y Oeste.

S: Punto cardinal Sur.

SAM: San Agustín del Maíz.

SAP: San Agustín del Pulque.

SE: Dirección localizada entre los puntos cardinales Sur y Este.

SFMA: Sistema de fallas activas Morelia-Acambay.

SIG: Sistemas de Información Geográfica.

SMC: Sierra Mil Cumbres.

SMO: Sierra Madre Oriental.

SW: Dirección localizada entre los puntos cardinales Sur y Oeste.

Tab: Abreviatura de la palabra tabla.

W: Punto cardinal Oeste, en su abreviatura derivada del inglés *Western*.

X: Coordenada Norte del Sistema de coordenadas geográficas WGS84.

Y: Coordenada Este del Sistema de coordenadas geográficas WGS84.



## Resumen

Para comprender la evolución estructural de una zona geotérmica es necesario entender las variaciones de los esfuerzos que la han afectado a través del tiempo, mismos que controlan la apertura y cierre de las fallas y fracturas que permiten la circulación de los fluidos en el probable yacimiento geotérmico. Desde el punto de vista tectónico, el Lago de Cuitzeo se localiza en la región perteneciente al límite sur de la zona de fallas Zacapu-Salvatierra, así como dentro del sector Oeste del sistema de fallas activas Morelia-Acambay, que tiene una orientación preferencial E-W y corta longitudinalmente la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). En las márgenes del lago se conocen unas cuatro zonas geotérmicas (Araró, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y Chucándiro). El objetivo del presente trabajo es definir la evolución de los sistemas geotérmicos presentes en la zona en función del sistema de fallas regionales, del campo de esfuerzos actual, y de la interacción con las estructuras más antiguas. Para ello se define la afectación estructural de fallas asociadas a distintos rellenos y la aparición de minerales neoformados durante las rupturas de las mismas. Además, por medio de la caracterización mineral (de relleno y neoformados) presente en las estructuras, así como de su fechamiento, se propone una evolución del termalismo relacionada con la cinemática en el área.

Palabras Clave: Mineralogía, geología estructural, cinemática, campo de esfuerzos, Sistemas Geotérmicos, Cuitzeo.

## **Abstract**

To comprehend the structural evolution of a geothermal zone is necessary to understand the variations of the stresses that have affected it over time, which control the opening and closing of faults and fractures that allow the circulation of fluids in the probable geothermal deposit. From the tectonic point of view, Lake Cuitzeo is located in the region belonging to the southern limit of the Zacapu-Salvatierra fault zone, as well as within the western sector of the Morelia-Acambay active fault system, which has a preferential orientation EW and longitudinally cuts the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt. On the banks of the lake there are four geothermal zones (Araró, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque and Chucándiro). The objective of the present work is to define the evolution of the geothermal systems present in the area based on the regional fault system, the field of current efforts, and the interaction with the oldest structures. For this, the structural affectation of faults associated to different fillings and the appearance of newly formed minerals during the ruptures thereof are defined. In addition, by means of the mineral characterization (filling and neo-formed) present in the structures, as well as their dating, an evolution of the thermalism related to the kinematics in the area is proposed.

Keywords: Mineralogy, structural geology, kinematics, field of efforts, Geothermal Systems, Cuitzeo.

## Capítulo I. Introducción

El estudio de una zona geotérmica, inicia con la revisión detallada del estado del arte y una realización de la carta geológica preliminar, posteriormente se ha de llevar a cabo una caracterización geológica del área de interés, durante la cual es indispensable que se tomen datos de la Geología Estructural, generando información sobre el campo de esfuerzos que afectan y han afectado a la misma.

En yacimientos termales alojados en rocas volcánicas, la mayor parte de la permeabilidad es de origen secundario, ya que estas rocas tienen generalmente una baja porosidad que se traduce en una baja o nula permeabilidad primaria, es por ello que la permeabilidad está controlada por un fracturamiento penetrante o por fracturas concentradas en zonas de falla, que se encuentran interconectadas entre sí facilitando la circulación de fluidos geotérmicos a través de ellas (Barnicoat *et al*, 2009, Tagami 2012).

Para comprender la evolución de una zona geotérmica es necesario entender las variaciones de los esfuerzos que afectan la zona a través del tiempo mediante los indicadores cinemáticos, mismos que con sus desplazamientos controlan la apertura, cierre y movimientos de las fallas y fracturas, que determinan la circulación de los fluidos en el área del yacimiento geotérmico estudiado.

La permeabilidad secundaria de una roca evoluciona por efectos de esfuerzos tectónicos y térmicos, durante dicha evolución se generan movimientos tectónicos de tipo frágil (fallas y fracturas) que en combinación con las contracciones térmicas en la corteza terrestre, aumentan la permeabilidad; por el contrario la expansión térmica, la deformación tectónica dúctil y la deposición de minerales secundarios tienden a sellar la permeabilidad secundaria.

En las fallas y fracturas se precipitan los minerales a partir de los componentes salinos disueltos en el agua termal, esta deposición es originada por las variaciones en la temperatura y presión del fluido al ascender a la superficie. Los minerales neoformados rellenan y sellan los conductos, disminuyendo la permeabilidad en la zona con el paso del tiempo. Por ello es importante estudiar y entender el sistema de esfuerzos activo que controla una zona, ya que ciertas estructuras deben ser favorables a él y serán las que abran nuevamente el

movimiento de las fallas y fracturas, manteniendo un flujo de agua constante en la zona.

Los minerales al precipitar adoptan la geometría de la estructura en que se alojan y también esta geometría influye en la forma del crecimiento, reflejándola tanto en superficie (manifestaciones hidrotermales), como en el plano de falla, en donde adquieren la forma del espacio en el que se han depositado y que son acordes con los efectos cinemáticos, como estrías y escalonamientos originados por los desplazamientos de las fallas. Conforme varía el campo de esfuerzos, cambia también las direcciones de estos indicadores; así, con ello se puede determinar la temporalidad de los diferentes eventos, mediante el principio de superposición aplicado a los marcadores cinemáticos. El volumen de la porosidad y el caudal de los fluidos aumenta con cada episodio de movimiento en la falla, pero luego disminuye a medida que la falla se rellena, volviendo a sellar la estructura con los minerales neoformados (Tripp et al, 2004).

La alteración hidrotermal se da mediante la transformación de fases minerales, el crecimiento de nuevos minerales, la disolución y/o precipitación y las reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma (Arenivar, 2012). El estudio de estas alteraciones hidrotermales representa una base importante para reconocer las características de un sistema geotérmico. Del estudio de éstas se puede determinar la paragénesis de los minerales de alteración y sus características físico-químicas, temperatura, y variaciones del fluido, es por ello la importancia del caracterizar los tipos de alteración hidrotermal asociados a un sistema geotérmico ya que permite inferir la evolución del sistema termal a través del tiempo y en el espacio (Forero-Herrera, 2012).

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) es definido como un arco magmático continental de dirección preferencial E-W que va desde el Océano Pacífico en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco, hasta el Golfo de México en Palma Sola, Veracruz, conformando la parte centro de la República Mexicana (Gómez-Tuena *et al*, 2005). El CVTM es una zona volcánicamente activa, en la que se alojan el 79% de las anomalías termales conocidas en México, esta distribución presenta dos subregiones, una definida como agrupamiento Sur y la otra como Porción Central y Occidental. A la primera

pertenece las anomalías termales en el Estado de Michoacán, cercanas a los lagos de Yuridia, Cuitzeo y Pátzcuaro, alojadas todas en depresiones tectónicas. A la segunda porción pertenecen las manifestaciones situadas en los estados de Nayarit, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, México, Hidalgo, Puebla y Veracruz (González-Ruiz *et al*, 2015).

En el Lago de Cuitzeo existen cuatro zonas con una cantidad importante de manifestaciones hidrotermales alcanzando temperaturas de hasta 95 °C y en las cuales se muestran evidencias del cierre de estructuras de flujo del agua por encontrar depósitos termales inactivos conviviendo con depósitos activos y presentando un lineamiento evidente con el campo de esfuerzos actual. A pesar de esto, hasta la fecha no se ha realizado en la zona del Lago de Cuitzeo ningún estudio para determinar la relación de los fluidos termales con las estructuras geológicas presentes en la zona, es por eso que en el presente estudio se mostrará la evolución en los campos de esfuerzos que han actuado sobre la cuenca de Cuitzeo, especialmente en las áreas cercanas a las actuales manifestaciones hidrotermales que se evidencian en superficie, de las cuales se cree proviene el agua termal que fluye y deposita los minerales en las fallas y fracturas. Así mismo se realizará un análisis para la caracterización mineral de las muestras que sean recolectadas en campo, mismas que forman parte del material de relleno en las fallas y fracturas a estudiar, proponiendo ambientes de formación y edades para los diferentes fallamientos por medio del fechamiento de los minerales de relleno.

En esta tesis se presentan nueve capítulos, viendo en los primeros seis la parte introductoria y metodológica con la cual se trabajó durante la investigación que se llevó a cabo para este trabajo, en el séptimo capítulo se aborda lo referente a la presentación de los resultados obtenidos en la investigación bibliográfica, del trabajo de campo y de laboratorio, los cuales son discutidos y analizados en el octavo capítulo, culminando con las conclusiones de la investigación que son abordadas a lo largo del noveno y último capítulo.

## **Capítulo II. Generalidades**

### **II.I- Planteamiento del problema**

En la exploración de las zonas geotérmicas en México, el fechamiento de minerales en estructuras geológicas no ha sido empleado para datar los episodios de actividad hidrotermal y tectónica. Procesos que sería de gran utilidad conocer para entender los periodos de recurrencia en la actividad tectónica y su influencia en los fluidos hidrotermales de un yacimiento geotérmico, logrando estimar la evolución del campo de esfuerzos pasado hasta llegar al actual, y con ello evaluar la permanencia de la permeabilidad secundaria efectiva en los campos geotérmicos.

Hasta la fecha no se ha estudiado la relación existente entre los yacimientos geotérmicos y la evolución del campo de esfuerzos que ha afectado a las zonas termales en el Lago de Cuitzeo, lo cual es una limitante para poder entender el porqué de las manifestaciones actuales y su interacción con las estructuras tectónicas que las albergan. En el presente estudio se analiza esta relación estructural a partir de los minerales neoformados durante fase de ruptura y que se han depositado rellenando las fallas geológicas presentes en las zonas geotérmicas del Lago de Cuitzeo.

Este estudio forma parte de los trabajos exploratorios de las zonas de estudio del proyecto número 17 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMie-geo), que desde el año 2014 se llevan a cabo en las manifestaciones geotérmicas del Lago de Cuitzeo.

## II.II Objetivos

### Objetivo General

El objetivo del presente trabajo es caracterizar los minerales secundarios formados en los planos de fallas o fracturas, fechar los periodos de actividad tectónica y evaluar su relación con la evolución de las zonas hidrotermales y los depósitos presentes en las rocas que conforman los yacimientos geotérmicos del Lago de Cuitzeo.

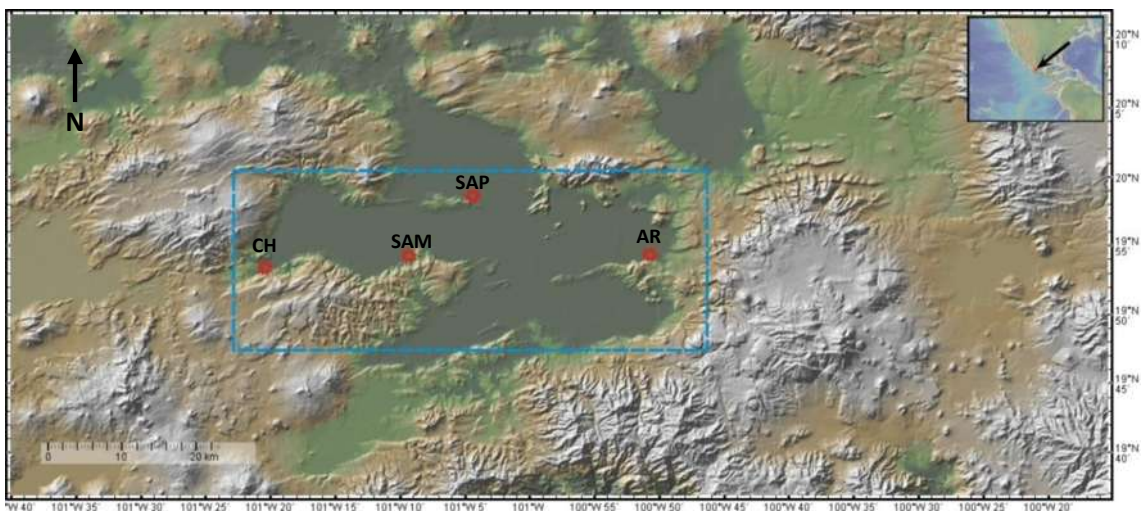
### Objetivos Particulares

- Realizar la cartografía estructural de detalle.
- Muestreo de minerales de relleno de las rocas de las zonas geotérmicas del Lago de Cuitzeo.
- Definir la afectación estructural de fallas asociadas a distintos rellenos y la aparición de minerales neoformados durante las rupturas de las mismas.
- Determinar las especies minerales presentes en las muestras, mediante análisis de Difracción de rayos X (DRX) y Espectroscopía infrarroja (EIR).
- Generar información de la temporalidad de las fallas mediante el fechamiento de los minerales hidrotermales muestreados.
- Generar una propuesta de la cinemática y de los yacimientos termales a partir del análisis de los minerales muestreados.

### II.III Zona de estudio

El Lago de Cuitzeo se localiza en la región Centro-Norte del estado de Michoacán y sur del estado de Guanajuato, entre los paralelos 19° 52' 16" N y 20° 06' 00" N y los meridianos 111° 20' 00" W y 111° 48' 40" W. Debido a que el Lago de Cuitzeo presenta una amplia extensión es considerado el segundo cuerpo de agua de origen natural más grande de la República Mexicana, solamente superado por el Lago de Chapala. El Lago de Cuitzeo ha sido clasificado como un cuerpo de aguas someras, salobres y endorreico (Medina-Vega, 2009).

Esta área alberga cuatro zonas de interés para la explotación geotérmica de mediana y baja entalpia, donde los valores de temperatura de los manantiales que se encuentran en la superficie tienen un promedio de 65 °C. La primera zona de Este a Oeste, es la zona de Araró, seguido del área de San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y por último la zona de Chucándiro (Fig.II. 1).



*Figura II.1. Modelo digital de elevaciones en el que se muestra la localización de la zona de estudio (recuadro azul), así como la localización de las 4 zonas geotérmicas presentes en el área, marcadas con los círculos rojos, de izquierda a derecha son Chucándiro (CH), San Agustín del Maíz (SAM), San Agustín del Pulque (SAP) y Araró (AR).*

El acuífero Principal de la Cuenca de Cuitzeo está alojado en facies granulares de secuencias lacustres o fluviales o bien por andesitas fracturadas, asociadas al sistema de fallas que configura la morfología de las riveras del lago de Cuitzeo, así como los manantiales asociados a la misma.



Según Israde *et al.*, (2002) las secuencias más antiguas están conformadas por rocas andesíticas muy fracturas, correspondientes al vulcanismo del complejo de Mil Cumbres de edad Oligo-Miocenica. Los subyace una secuencia de flujos piroclásticos color rosa principalmente. Estos a su vez son cubiertos por secuencias de terrígenos de origen lacustre o fluvio-lacustre pertenecientes al Mio-Pleistoceno. Por último el vulcanismo del Plioceno-Pleistoceno corona las secuencias de pómez que termina con los depósitos del paleolago de Cuitzeo o bien por el vulcanismo monogenético.

## **Capítulo III. Estado del Arte**

El Lago de Cuitzeo ha sido objeto de varios estudios geocientíficos por su amplio territorio, evolución y características, es por ello que estos estudios podrían ser agrupados en las siguientes áreas:

### **III.I.-Estudios de Estratigrafía de las secuencias lacustres.**

Uno de los estudios más importantes en esta área se presenta en el año 2010, por Israde-Alcantara y colaboradores, este fue titulado “Evolución Paleolimnológica del Lago Cuitzeo, Michoacán durante el Pleistoceno-Holoceno” y en el presentan los resultados obtenidos tras el estudio de un núcleo de 27 metros de largo que se perforo en el depocentro del lago, y de cuatro trincheras que fueron descritas en las zonas proximales del mismo. Entre sus conclusiones se encontró que a lo largo de los últimos ca. 100 ka a.P se han detectado cinco fases de humedad en la cuenca de Cuitzeo, la primera hace 100 ka, la segunda ca. 50 ka, la tercera de ca. 44 ka a 42 ka, la cuarta entre ca. 31 ka y 32 ka y la última al final del último glacial máximo y durante el Glacial tardío, entre ca. 20 y 14 ka. Estas fases de humedad se interpretan como un ascenso del nivel lacustre o condiciones más diluidas, ocasionados por un flujo de agua dulce.

### **III.II.-Estudios de Geología Estructural y Vulcanología.**

Uno de los estudios estructurales más importantes llevados a cabo en la zona de estudio es el presentado en 2011 por Mennella y se titula “Sismotectónica del sector occidental del Sistema Morelia-Acambay, México, a partir del análisis de poblaciones de fallas”, en este trabajo se realiza un estudio y caracterización de las principales fallas en la región de Morelia-Cuitzeo, encontrando que las pertenecientes al Sistema de Fallas Activas Morelia-Acambay ( SFMA), se caracterizan por una orientación preferencial E-W y ENE-WSW, algunas rebasando los 25 km de Longitud y la altura promedio de los escarpes es cercana a los 100m.

En 2015 se presenta el trabajo “*The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt*”, por Gómez-Vasconcelos *et al.*, en él se realizó un estudio detallado de los depósitos volcánicos de la Sierra Mil Cumbres (SMC) ubicada

al sur del Lago de Cuitzeo, con lo que se genera un gran aporte al conocimiento geológico de esta región, el cual hasta antes de éste estudio solo se había estudiado de manera regional. Entre sus conclusiones se determinó que las rocas de la SMC se originaron a partir de diferentes tipos de magmas basálticos, provenientes del manto o corteza inferior heterogénea en un ambiente de subducción, donde ocurrieron diferentes grados de fusión parcial, mezcla de magmas, cristalización fraccionada y asimilación cortical, que les dieron sus características particulares eruptivas.

### **III.III.-Estudios con un enfoque geotérmico.**

En la zona de estudio se han realizado estudios con respecto a los campos geotérmicos, en especial por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) quienes, desde abril de 1983 a cargo Bigurra-Pimentel y colaboradores, llevaron a cabo un estudio geofísico en el borde sur del Lago de Cuitzeo, titulado “Estudio Geofísico San Agustín del Maíz”. El estudio se basó en el método eléctrico resistivo y cuyo objetivo fue definir los mínimos resistivos en las zonas geotérmicas de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo, así como los rasgos estructurales que puedan existir dentro del Lago de Cuitzeo. El estudio concluyó en la localización de cuatro zonas de baja resistividad en las poblaciones mencionadas y dos más a 2Km de las mismas, los autores la asocian con zonas termales en el subsuelo.

Durante agosto de 1983 Arredondo-Fragoso llevó a cabo el estudio titulado “Levantamiento Gravimétrico en la zona central de la Laguna de Cuitzeo, Mich.”, cuyo objetivo fue detectar posibles estructuras que estuvieran cubiertas por materiales más recientes dentro de la Laguna de Cuitzeo. De este estudio se concluyó que según el análisis de gases y geotermómetro (Na-K-Ca), la temperatura a profundidad es de 192°C y que de existir un yacimiento geotérmico, éste se encuentre alojado en las andesitas basales.

En Enero de 1984 Tello-Hinojosa y Quijano-León, realizaron el estudio titulado “Reconocimiento y evaluación Geoquímica de las zonas Termales del Lago de Cuitzeo”, en él concluyen que existen cuatro zonas atractivas para generar energía eléctrica a partir de vapor endógeno y que la más atractiva es Araró,

siguiéndoles las zonas de San Agustín del Maíz y San Juan Tararameo, quedando al último las zonas de Coro.

En febrero de 1985 Vargas-Ledezma realizó la “Sinopsis del estudio geohidrologico los Azufres-Cuitzeo, Estado de Michoacán” en él realiza una compilación de los datos generados por los estudios previos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para el área de estudio y entre sus conclusiones interpreta que el sistema geotérmico de los Araró y Huingo son una descarga del fluido geotérmico de Los Azufres controlada por el sistema de fallas NE-SW.

En 2005 Segovia y sus colaboradores, realizan el estudio titulado “*Geochemical Characteristics and <sup>222</sup>Rn Measurements at Cuitzeo Basin (Mexico) Thermal Springs and Artesian Wells*” este estudio se realizó con el objetivo de evaluar las temperaturas de los yacimientos geotérmicos mediante el radón presente en la misma. En él se concluyó que con base en los datos químicos de los pozos y manantiales de las áreas de estudio, podrían producirse uno o más reservorios geotérmicos con temperaturas que varían entre los 165 y los 220 °C.

#### **III.IV.-Estudios de impacto ambiental y características del acuífero.**

En agosto del 2008 Medina-Vega realizó la tesis titulada “Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímico para generar un modelo conceptual del acuífero de Cuitzeo, Michoacán México”, cuyo objetivo consistió en generar un modelo geohidrológico conceptual del acuífero de Cuitzeo y así realizar una simulación del mismo. Entre sus conclusiones define tres acuíferos dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, además postula como origen de las manifestaciones hidrotermales a los cuerpos ígneos sepultados bajo los sedimentos del lago y constituyen sistemas hidrotermales separados unos de otros.

En el año 2010 se presenta la edición número uno del “Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y su entorno Sociambiental”, que presenta una compilación sobre la información de las características físicas, la biodiversidad, características socioeconómicas, la infraestructura, el manejo del agua y generalidades sobre el Lago de Cuitzeo. Entre los que destaca el gran tectonismo en el área pues se localiza entre la Sierra de Mil Cumbres (oligoceno-mioceno) y el Cinturón Volcánico Mexicano (pliocuaternario).

### **III.V.-Estudios relacionados con el tema de investigación.**

En el año 1990 Ordóñez y colaboradores presentan su trabajo: “Datación radiogénica ( $U^{234}/U^{238}$  y  $Th^{230}/U^{234}$ ) de sistemas travertinos del Alto Tajo (Gdj.)”, en el cual se demuestra la existencia, de al menos, tres o más etapas importantes de formaciones travertínicas en la zona de estudio, siendo las etapas más antiguas las correspondientes a edades superiores a 350Ka, seguidas de una etapa identificada como Rio Ruguilla y por último la etapa más joven con una edad de 91,900 años. Estos datos obtenidos a partir del fechamiento de muestras minerales recolectadas en la zona.

En 1996 Pérez-Segura y colaboradores presentan el trabajo: “Geología, mineralización, alteración hidrotermal y edad de Oro de San Francisco, Sonora-un deposito mesotermal en el Noreste de México”, en él se presenta un análisis Geológico-estructural de la mineralización de origen hidrotermal en rocas graníticas del terciario y en cual logran identificar minerales neoformados de cuarzo-turmalina, albita, seriecita, clorita y calcita, que se depositaron en estructuras que muestran un transporte preferencial del Noreste al Suroeste. Obteniendo una edad para el deposito hidrotermal de 41Ma, mediante datación por  $^{40}Ar/^{39}Ar$ .

Durante 2001 se realizó el estudio *“Hydrothermal minerals and microstructures in the Silangkitang geothermal field along the Great Sumatran fault zone, Sumatra, Indonesia”*, por Moore *et al.*, en el cual se analizan, mediante espectrometría de rayos X y microscopía electrónica de barrido, los minerales encontrados en trece núcleos extraídos de zonas de falla con presencia de manifestaciones termales. En el concluyen que las características de los minerales hidrotermales estudiados, sugieren que el flujo de calor y los fluidos termales de la zona de estudio, se han centrado a lo largo de una zona estrecha de la traza principal de la falla Great Sumatra y que una falla secundaria puede actuar como barrera de permeabilidad entre los depósitos existentes.

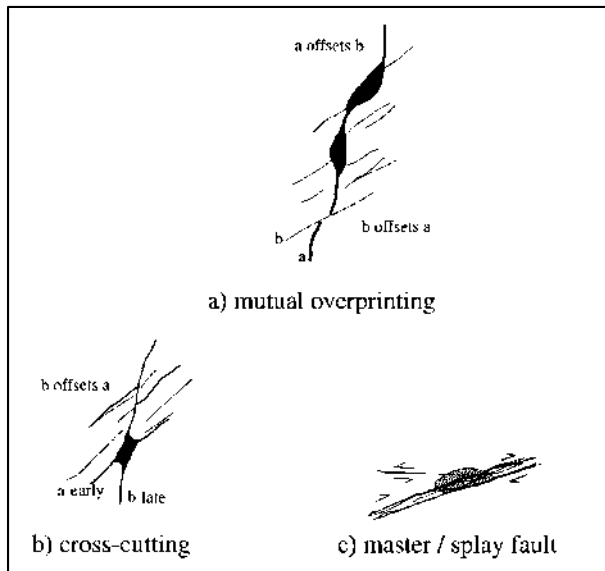


Figura III.1. Imagen de los tipos de las interacciones Falla-Falla descritas por Triip et al., 2004.

En 2004 Triip y colaboradores presentan su trabajo titulado: *“Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration”*, en este trabajo se caracterizan texturalmente los planos de falla, evaluando las maneras en las que se mejora la densidad de fracturas dentro del plano de falla identificando los cambios en la geometría de la falla, las intersecciones de falla-

falla y por último las intersecciones de falla-anisotropías existentes (Fig. III.1) (contactos de capas, diques, zonas de endurecimiento por alteración de la roca, etc.). Dentro del estudio se reconocen las estructuras como un ordenador para tener control sobre la localización del mineral.

En el 2006 Ruggieri y colaboradores presentan el trabajo: *“Hydrothermal alteration in the Berlin geothermal field (El Salvador): new data and discussion on the natural state of the system”* en el estudio se presentan datos de la alteración hidrotermal, junto con la distribución en la profundidad, análisis microscópicos de los minerales hidrotermales y la geoquímica de las rocas alteradas. Entre los resultados se encontró que existen agrupaciones con abundancia de minerales a diversas profundidades, dividiendo el campo en cuatro zonas la más somera va de los 0m a los 600m con una mineralogía de nontronita, montmorillonita, corrensita, cuarzo, calcita y heulandita. La segunda zona va de los 670m a 1630m con mineralogía de calcita, clorita y cuarzo. La tercera zona va de los 1100m a 1840m con mineralogía de albita, cuarzo, clorita y calcita. Por último las zonas mayores a 1460m con mineralogías de epidota, albita y cuarzo.

En 2012 Forero-Herrera, presenta su tesis de maestría titulada: *“Caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia”*, en la cual se analizan 56 muestras correspondientes a

productos recientes de la alteración hidrotermal y precipitación de minerales en fuentes hidrotermales, mediante el método de difracción de rayos X en la fracción de arcilla, mediante la técnica de polvo desorientado. Logrando describir y diferenciar seis sectores con diferente paragénesis mineral, lo que considera como resultado del desarrollo de varios sistemas hidrotermales relacionados a una o diferentes fuentes de calor en el mismo volcán.

Otro trabajo más reciente es el de Mizoguchi y colaboradores con el título: “*Microfractures within the fault damage zone record the history of fault activity*”, presentado en 2013, en él se analizan las fases por las que atraviesan las microfracturas dependiendo su cercanía a falla que las generó, además realizan una clasificación de las

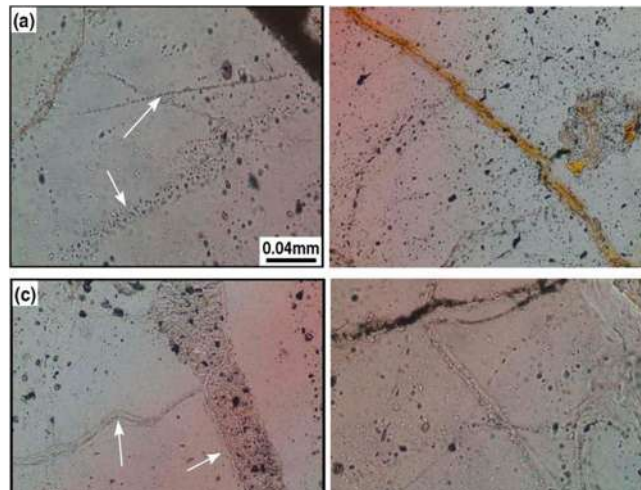


Figura III.2. Imagen de los tipos de microfracturas estudiadas por Mizoguchi, 2013.

microfracturas, en base a si están rellenas de minerales o no (Fig. III.2). Dentro de sus conclusiones se destaca el hecho de estimar la dirección y periodos de fallamiento a partir del estudio de estas estructuras y así contribuir a la generación de una base de datos de periodos de recurrencia en la actividad de grandes fallas.





geotérmica Greater Oikaria. Entre sus conclusiones destaca que los minerales estudiados se pueden encontrar a diferentes profundidades en el campo geotérmico, sin embargo su presencia tiene un significado específico, por ejemplo hay aquellos cuya aparición indica una baja temperatura de formación, como la zeolita y caolinita, mientras que minerales como la calcita, epidota, pirita, actinolita y adularia indican condiciones de ebullición; además la andalucita, pirita y epidota son indicadores de una buena permeabilidad. La epidota y actinolita nos indican temperaturas de 250°C y 280°C respectivamente.

A nivel general, en comparación de otros estudios, el estudio de los minerales hidrotermales formados en fallas y fracturas se ha desarrollado poco y la información al respecto es escasa, sin embargo es un campo que ofrece muchas aplicaciones para la información generada a partir de este tipo de análisis.

Como se puede apreciar en este análisis de los trabajos existentes existe una cantidad muy pobre sobre el tema de investigación de esta tesis, siendo en otros países donde se ha logrado presentar información más acorde al tema de investigación y se ha comenzado a valorar la importancia del estudio de la evolución del campo de esfuerzos junto con la de los sistemas geotérmicos presentes en las diferentes partes del mundo.

## Capítulo IV. Marco Tectónico

La zona de estudio se encuentra en el sector central de la provincia tectónica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) (Pasquarè *et al.*, 1991; Ferrari L., 2007 y Ferrari L, *et al.*, 2012) la cual es producto de la subducción de las placas de Rivera y Cocos bajo la placa Norteamericana (Pardo *et al.*, 1995).

La FVTM es definida como un arco magmático continental de dirección preferencial E-W que va desde el océano Pacífico en San Blas, Nayarit y Bahía de Banderas, Jalisco hasta el Golfo de México en Palma Sola, Veracruz (Demant A., 1978), con una evolución que comenzó en el Mioceno medio y continua en la actualidad (Gómez-Tuena, 2007).

En el sector central del CVTM se considera una evolución particular en el ámbito del campo de esfuerzos, considerando a la compresión con dirección E-W como la causante de la reactivación del pliegue de Tzitzio, durante la cual se dio una fuerte afectación a las rocas volcánicas de la Secuencia Inferior de la Sierra Madre Oriental (SMO). Posteriormente se generan fallas extensionales de dirección N160°-180°, sobre las estructuras de la Secuencia Intermedia de la SMO, las cuales se ven fuertemente fragmentadas y dislocadas por diferentes conjuntos de fallas, además de que sus escarpes presentan un alto grado de erosión. Mediante un análisis tectónico se determinó que la posición del  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  es sub-horizontal en concordancia con una extensión de dirección N58°-84°. En seguida se dio origen a un sistema conjugado de fallas con dirección preferencial N25°-45° y N60°-75°, con movimiento laterales derechos e izquierdos respectivamente y los cuales dislocan a las estructuras precedentes. En depósitos volcánicos de la parte inferior del CVTM se registró una importante fase transpresiva, que se revela en la reactivación de fallas laterales Izquierdas sobre planos de falla preexistentes con dirección N60°-75° y N80°-100°. La última fase de deformación registrada afecta los depósitos aluviales y volcánicos recientes, con una dirección preferencial de  $\sigma_3$  de N170°-190°, mostrando una concentración de esfuerzos en estructuras de falla con dirección N80°-100°, los cuales concuerdan con mecanismos focales generados en la zona de Acambay (Pasquarè *et al.*, 1988).

De manera más local la zona de estudio se localiza dentro de la región perteneciente al límite sur de la zona de fallas Zacapu-Salvatierra, que se encuentra definida por un grupo de alrededor de 25 fallas con actividad Cuaternaria en el área delimitada en el Norte y Este por el Río Lerma y al Sur por el Lago de Cuitzeo (Suter *et al.* 2001); así mismo se encuentra dentro del sector este del Sistema de Fallas Activas Morelia-Acambay (SFMA), que tiene una orientación preferencial E-W y corta longitudinalmente la parte central del CVTM. El Sistema de Fallas activas Morelia-Acambay representa tectónicamente uno de los sectores más relevantes de la región, el cual en su parte occidental genera planos de falla con una inclinación al Norte y bascula al Sur a las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno, la parte oriental se caracteriza por una estructura tipo graben formado por las fallas Epitacio Huerta y Acambay-Tixmadeje, al Norte, y las fallas Venta de Bravo y Pastores, al Sur; que exhiben una pequeña componente lateral izquierda (Suter *et al.*, 1995b, en Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

En la cuenca de Cuitzeo, las fallas pertenecientes al SFMA se manifiestan con una dirección preferencial ENE-WSW (Fig. IV.1) además de encontrar sistemas reactivados con dirección preferencial NNW-SSE, (Martínez *et al.*, 1990; Suter M. *et al.*, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Menella, 2011).

Al SFMA se la considera con una tectónica activa asociada a eventos sísmicos históricos como lo son el de Acambay en 1912 (Suter M. *et al.*, 1995; Suter M. *et al.*, 2016) y el de Maravatio en 1979 (Garduño-Monroy *et al.*, 1992). Su zona occidental está caracterizada por la existencia de un límite cortical identificado como Sistema de Fallas Tzitzio-Valle de Santiago con una dirección preferencial NW-SE que exhibe una componente derecha (Garduño-Monroy *et al.*, 2009), esta estructura separa el área de estudio en dos dominios estructurales, uno al oriente conformando el llamado Graben de Cuitzeo y al poniente el Semigraben de Cuitzeo (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

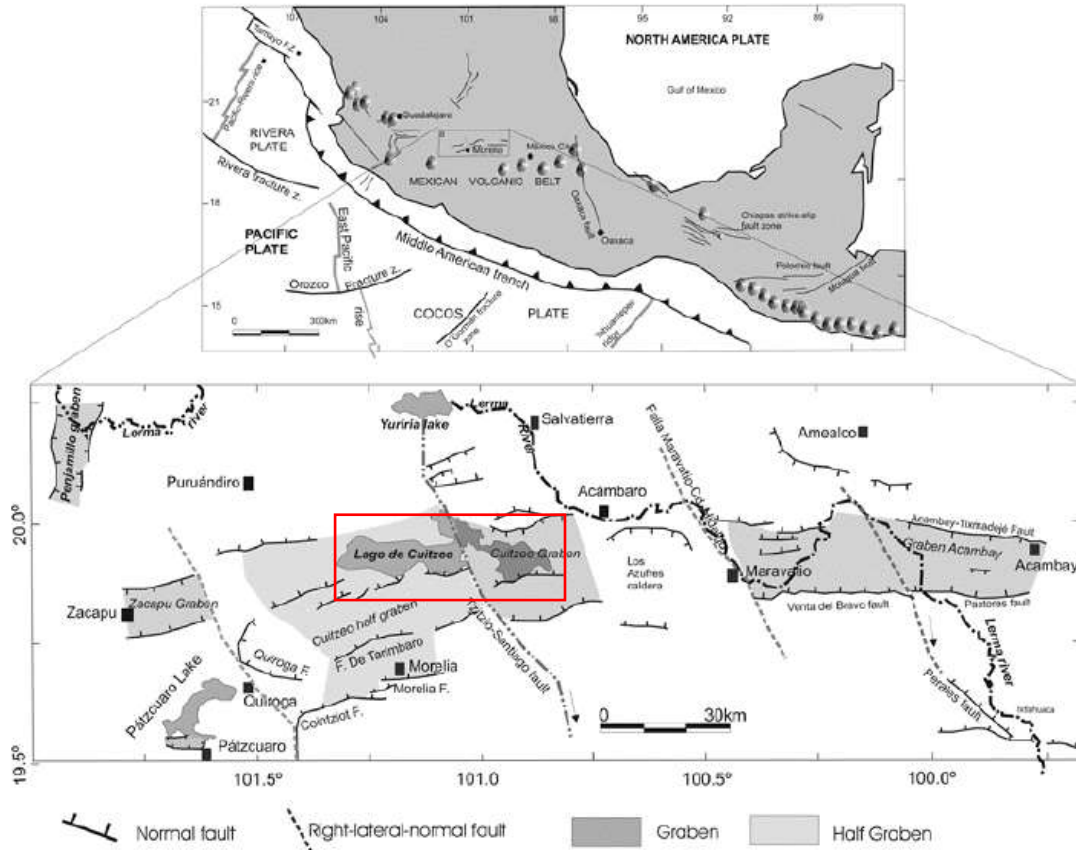


Figura IV.1 Principales sistemas de estructuras presentes en la parte central del Cinturón Volcánico TransMexicano. Sistema de Fallas Morelia-Acambay ENE-WSW y el sistema heredado del Basing and Range~NW-SE (Tomado de Garduño-Monroy et al., 2009), se enmarca la zona de estudio en el recuadro rojo.

## Capítulo V. Marco Teórico

### V.I.- Geotermia en México.

La geotermia es una fuente renovable que se ha utilizado en el mundo para generar energía eléctrica desde 1911, y en México desde 1959 cuando empezó a operar la primera unidad geotermoeléctrica en el país, con 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, actualmente fuera de operación. El país cuenta con amplia experiencia en la generación geotermoeléctrica, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), opera actualmente 38 unidades con una capacidad instalada total de 958 MW.

En 2011 la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) publicó una estimación volumétrica del potencial geotérmico total de México (Fig. V.1), con base en un catálogo de 1300 manifestaciones termales. Estas fueron clasificadas, de acuerdo a la estimación de sus temperaturas de fondo con base en geotermómetros, en tres rangos de temperatura: alta ( $> 200^{\circ}\text{C}$ ), media ( $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ) y baja ( $90\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ). En cada zona de manifestaciones se asumió una superficie de 1 kilómetro cuadrado, un espesor de 2 kilómetros, una porosidad de 15%, un factor de recuperación de calor del 25%, factores de eficiencia de conversión de energía térmica a eléctrica de 0.18 (más de  $200^{\circ}\text{C}$ ), 0.125 ( $150\text{--}200^{\circ}\text{C}$ ) y 0.11 ( $90\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ), un factor de planta de 0.95 y un tiempo de vida útil de 30 años. Con esos datos, se calculó un potencial geotérmico probable (reservas tipo 2P) de 2077 MW y uno posible (reservas tipo 3P) de 7423 MW, en ambos tipos para recursos de baja a alta entalpía ( $90$  a más de  $200^{\circ}\text{C}$ ). Por su parte, las reservas probadas (tipo 1P) se consideraron como los proyectos de ampliación de capacidad instalada en los cuatro campos en operación actual (Cerro Prieto en Baja California Norte, Los Azufres en Michoacán, Los Humeros en Puebla y Las Tres Vírgenes en Baja California Sur) más el potencial evaluado en el campo de Cerritos Colorados, Jal., obteniendo así un potencial de 186 MW, adicionales a los 958 MW de capacidad instalada actual. En total, tomando en cuenta los tres tipos de reservas definidos, la GPG concluye que el potencial geotermoeléctrico total de México es de 9686 MW, es decir unas diez veces la capacidad instalada actual. Si sólo

se consideraran las reservas probadas, probables y posibles de temperaturas medias a altas (>150°C), el potencial total sería de 8623 MW (Hiriart *et al*, 2011).

Zona geotérmica	Estado	Potencial estimado en MW		
		Modelo volumétrico*		Modelo de descompresión
		Valor probable	Rango (90%)	
1. La Soledad	Jalisco	52	10 – 94	51
2. Las Planillas	Jalisco	70	26 – 113	83
3. Pathé	Hidalgo	33	6 – 61	49
4. Araró	Michoacán	21	5 – 37	32
5. Acozulco	Puebla	107	38 – 177	48
6. Ixtlán de los Hervores	Michoacán	17	0 – 23	15
7. Los Negritos	Michoacán	24	3 – 44	20
8. Volcán Ceboruco	Nayarit	74	34 – 113	50
9. Graben de Compostela	Nayarit	105	35 – 175	110
10. San Antonio El Bravo (Ojinaga)	Chihuahua	27	10 – 43	36
11. Maguarichic	Chihuahua	1	0.2 – 1.7	1
12. Puruándiro	Michoacán	10	3 – 17	12
13. Volcán Tacaná	Chiapas	60	21 – 99	52
14. El Orito-Los Borbollones	Jalisco	11	1 – 21	9
15. Santa Cruz de Atistique	Jalisco	12	2 – 22	13
16. Volcán Chichonal	Chiapas	46	9 – 84	45
17. Hervores de la Vega	Jalisco	45	20 – 71	45
18. Los Hervores-El Molote	Nayarit	36	12 – 59	17
19. San Bartolomé de los Baños	Guanajuato	7	3 – 12	9
20. Santiago Papasquiaro	Durango	4	1 – 7	4
<b>Total</b>		<b>762</b>		<b>701</b>

Figura V.1 En la imagen se muestra el potencial geotermoeléctrico conjunto estimado en 20 zonas geotérmicas en actual exploración (Hiriart *et al*, 2011).

## V.II.- Control estructural del fluido geotérmico.

Para yacimientos termales alojados en rocas volcánicas, la mayor parte de la permeabilidad es aportada por las fallas y fracturas interconectadas, las cuales facilitan el flujo del fluidos geotérmicos a través de ellas, puesto que este tipo de rocas por sus características tienen una permeabilidad primaria baja o nula (Barnicoat *et al*, 2009, Tagami, 2012). La permeabilidad de una roca evoluciona por efectos de esfuerzos tectónicos y térmicos, durante dicha evolución se generan movimientos tectónicos de tipo frágil (fallas y fracturas) que en combinación con las contracciones térmicas en la corteza terrestre, aumentan la permeabilidad; por el contrario la expansión térmica, la deformación tectónica

dúctil y la deposición de minerales secundarios tienden a sellar la permeabilidad secundaria.

En un medio fracturado se debe considerar que no todas las fracturas y fallas funcionan como conductos para los fluidos geotérmicos (Long *et al.*, 1991). Se requiere un análisis detallado para construir modelos geológicos estructurales dinámicos, cinemáticos y si es posible los modelos geomecánicos en los yacimientos termales estudiados; a fin de determinar cuáles fracturas naturales están orientadas en forma óptima con respecto al campo de esfuerzos actuante y además, estudiar si están sometidas a esfuerzos críticos de corte. De esta manera se puede definir su rol en la contribución relativa al flujo de fluidos (Fig. V.2).

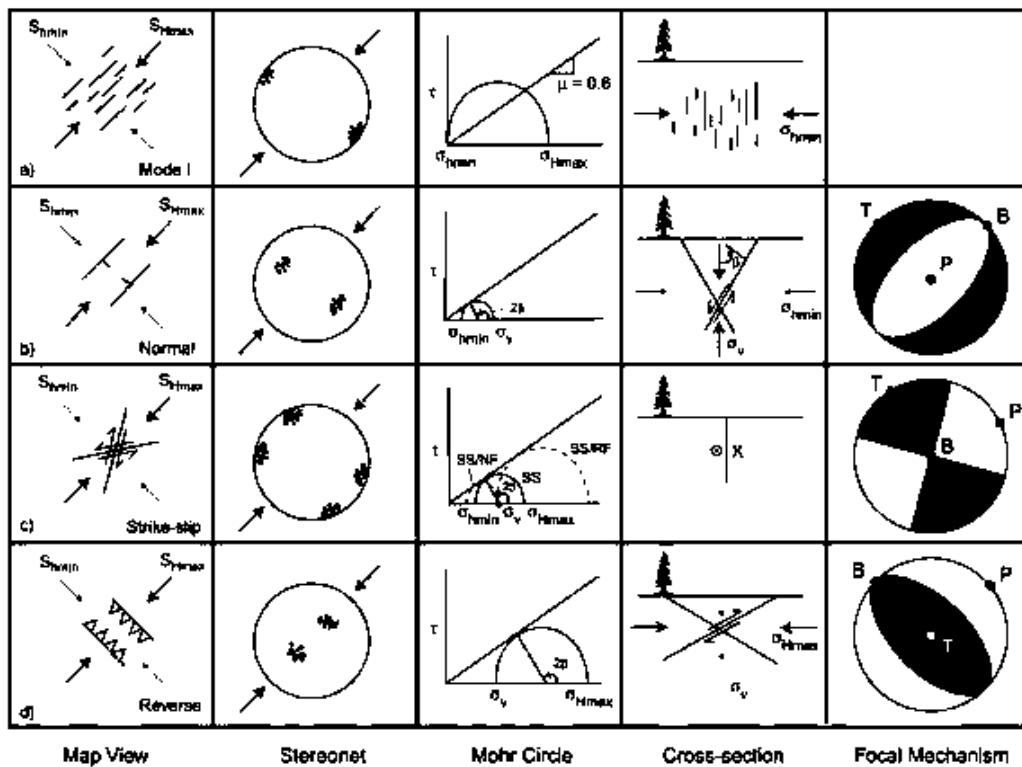


Figura V.2. Esquema donde se representan la interacción de esfuerzo máximo y esfuerzo mínimo respecto a estructuras geológicas y fallas.

### **V.III.- Difracción de rayos X.**

Los métodos de difracción de rayos X constituyen la herramienta más poderosa de que se dispone para el estudio de la estructura óptima de la materia cristalina. Siendo así que la mayor parte de la información que poseemos de las estructuras internas cristalinas es gracias a esta técnica.

Los rayos X interactúan con la materia a través de los electrones que la forman y se están moviendo a velocidades mucho menores que la luz. Es así que cuando la radiación electromagnética X alcanza un electrón cargado este se convierte en fuente de radiación electromagnética secundaria dispersada, por lo que si incide un haz de rayos X sobre un cristal, este choca con los átomos haciendo que los electrones que se encuentren en su trayectoria vibren con una frecuencia idéntica a la de la radiación incidente y actúan como fuentes secundarias de nuevos frentes de onda de rayos X con la misma longitud de onda y frecuencia.

El objeto de estudio puede ser sustancias mono- o policristalinas, lo cual presenta una gran ventaja a la hora de determinar las especies minerales encontradas en las muestras recolectadas en la o las zonas de estudio.

En general esta técnica se emplea con dos objetivos principales:

1. Estructuralmente (Cristaloquímica de compuestos puros).
2. Analíticamente (identificación y determinación de fases en la mezcla).

El análisis se basa en las propiedades de los rayos X de penetrar en el interior de las sustancias y refractarse con la ley de Wulf-Bragg desde los planos atómicos de la red cristalina. Actualmente todos los equipos de rayos X son completamente computarizados lo que permite realizar automáticamente todas las operaciones de barrido y evaluar los difractogramas obtenidos, generando de esta manera una confiable caracterización de las especies minerales presentes en la muestra y la interacción de las mismas en el yacimiento geotérmico.



#### **V.IV.- Espectroscopia Infrarroja.**

Entre las distintas regiones espectrales de la radiación electromagnética, el intervalo infrarrojo reviste de gran interés en el estudio cristaloquímico de los minerales. Prácticamente, todos los minerales presentan bandas de absorción/reflexión en la región espectral infrarroja (principalmente entre 2.5-25 micrómetros).

La absorción de radiación infrarroja por moléculas está asociada a cambios en los estados vibracionales y/o rotacionales. Los modos de vibración de una molécula incluyen deformaciones tipo tracción (elongación)-compresión y bandeo. La finalidad de las aplicaciones de EIR, es la determinación de los grupos funcionales que contiene un determinado mineral, a partir del estudio de los espectros de absorción/ transmisión/ reflexión en la región espectral determinada.

El método de EIR se basa en el estudio de los espectrómetros de vibración y rotación de las moléculas. La energía de la molécula (ion, red cristalina) se puede representar en forma de tres componentes aditivos relacionados: 1) con el movimiento de los electrones, 2) con las vibraciones de los átomos que forman la molécula, 3) con la rotación de la molécula.

#### **V.V.- Microscopia Electrónica de Barrido.**

El microscopio electrónico de barrido (MEB) ofrece una solución ideal a los problemas que presentan los microscopios ópticos ( $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$ ) que no pueden obtener resolución atómica ya que la longitud de onda de la radiación incidente es demasiado grande.

Con el MEB se pueden obtener electrones acelerados con  $\lambda$  asociada bastante menor de  $1 \text{ \AA}$ , y por tanto se puede obtener, al menos teóricamente, resolución atómica. Con las lentes adecuadas se puede transformar los electrones difractados en la imagen real. Esto hace que la información que se obtiene de cada uno sea distinta. El MEB posibilita conocer la morfología superficial. Un generador de barrido es el responsable de producir el movimiento del haz, de manera que barra la muestra punto a punto.

De la interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, las cuales pueden ser captadas con detectores

específicos para cada una de ellas. El detector capta una señal y las convierte en una señal electrónica que es proyectada en una pantalla.

Para facilitar esta emisión de electrones se metaliza la muestra que es recubierta de una pequeña capa de un metal conductor como el Au. El haz de e- se puede concentrar en una zona diminuta ( $\sim 20 \text{ \AA}$ ) que puede barrer la superficie del espécimen al ser deflectado por bobinas adecuadas.

Los electrones secundarios se detectan por encima del espécimen y la imagen muestra la intensidad de los electrones secundarios emitidos por las diferentes partes de la muestra.

#### **V.VI.- Microtomografía de Rayos X.**

El principio básico de la Microtomografía de rayos X, es la detección de contraste de densidad de materiales, como respuesta a la excitación con rayos X. El resultado es una imagen de contraste de densidades en 2 dimensiones, que puede ser calibrada para la identificación y la visualización de la distribución de los objetos de distinta densidad en una sección de la muestra de estudio. Si se realiza una secuencia semi-continua de imágenes, se puede lograr la reconstrucción virtual del objeto en 3 dimensiones. El empleo de esta técnica representa una herramienta de gran utilidad en las Geociencias debido a que permite la visualización y cuantificación de la estructura interna (3D) de diversos tipos de materiales. Si bien todavía no existe un uso masivo de ella, algunos ejemplos son estudios de estimación de permeabilidad y de porosidad primaria y secundaria, además de la estructura de porosidad y visualización la heterogeneidad en la matriz de muestras de roca y suelo.

Esta técnica permite analizar muestras de rocas y minerales de un tamaño entre 1 mm y 7 cm, con una resolución de  $1080 \times 672$  y un tamaño de pixel de  $26 \mu\text{m}$  ó una resolución de  $2016 \times 1344$  y un tamaño de pixel de  $13 \mu\text{m}$ . Entonces, esta caracterización puede entregar importante información acerca de la arquitectura de la roca a escala de centímetros a micras, lo que puede ser extrapolado de manera autosimilar a otras escalas geológicas de trabajo.

## Capítulo VI. Metodología y equipo

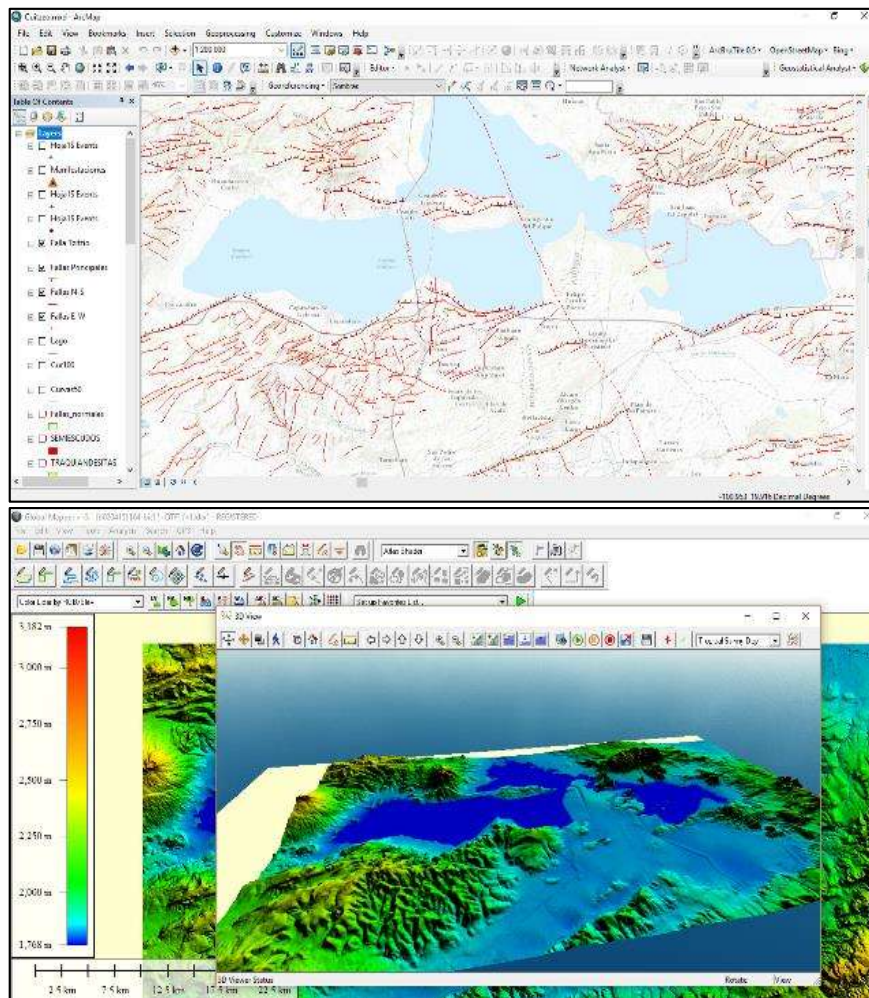
El trabajo realizado durante este estudio consistió en varias etapas en las que se incluye el trabajo de gabinete, el trabajo con las muestras y el equipo usado. Estas etapas se presentan a continuación, explicando el desarrollo de cada una.

### VI.I.- Gabinete

El trabajo de gabinete se comenzó haciendo una recopilación bibliográfica y cartográfica de investigaciones realizadas con anterioridad en la zona de estudio. En ella, se analizó información de artículos científicos, tesis y reportes técnicos, con el objetivo de obtener un conocimiento detallado sobre el estado del arte del área de estudio, con el que se elaboró un mapa geológico. Para este mapa se usaron como base cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) de escala 1:50,000 con las cuales se elaboró un mosaico utilizando las cartas de Moroleón (F14C83), Zinapécuaro (E14A14) y Acámbaro (F14C84), con esta información también se localizaron las comunidades y vías de acceso a las diferentes estaciones propuestas para el posterior desarrollo del trabajo de campo en el área de estudio. La cartografía previa obtenida se realizó con la consulta de trabajos previos y usando fotografías aéreas en tonos de grises, las líneas de vuelo utilizadas fueron 20a, 145, 146 y 147, de escala 1:50,000 y 1:75,000. Para la fotointerpretación se utilizó una técnica que consta de empalmar un par de fotografías observándolas con un estereoscopio de espejos (modelo utilizado: ST4 hecho en la Federación Rusa por EOMZ FNr 94396), de la misma forma se usaron *software* de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como Global Mapper V.16, Arc Gis V.10.3 y Google Earth V.9 (Fig. VI.1), que permitieron planear los recorridos estratégicos a seguir durante las salidas a campo y detectar estructuras de falla con alto potencial para encontrar planos mineralizados. Con lo ya mencionado se conformó un mapa geológico y estructural en el que se identificaron unidades litológicas y rasgos estructurales como fallas, fracturas y lineamientos, que posteriormente fueron corroborados o modificados durante el desarrollo del trabajo de campo.

Durante y una vez concluido el trabajo de campo, se realizó la corrección de la cartografía generada con la bibliografía, así mismo se llevó a cabo el análisis y

la interpretación de los resultados obtenidos en el trabajo de laboratorio y la síntesis de éstos para plasmarlos en el presente trabajo.



*Figura VI.1. En la figura de arriba se muestra el espacio de trabajo de los software Arc Gis V.10.3 (imagen superior) y Global Mapper V. 16 (imagen inferior). Utilizados durante el trabajo de gabinete.*

## VI.II. Muestras

Para cumplir el objetivo de la caracterización de las especies de los minerales neoformados y el estudio de su morfología se llevaron a cabo diferentes análisis, es por esto que se presentan las etapas que se siguieron para alcanzar este objetivo.

### VI.II.I.- Muestreo

El muestreo en las fallas, fracturas y zonas de alteración se realizó de la siguiente manera:

Se comenzó por definir las principales estructuras de falla y lineamientos presentes en la zona de estudio, esto mediante el estudio de la cartografía previa del área de estudio, generada durante la generación del estado del arte de la zona (Fig. VI.2), plasmando la información en mapas y modelos del terreno realizados con los *software* antes mencionados.

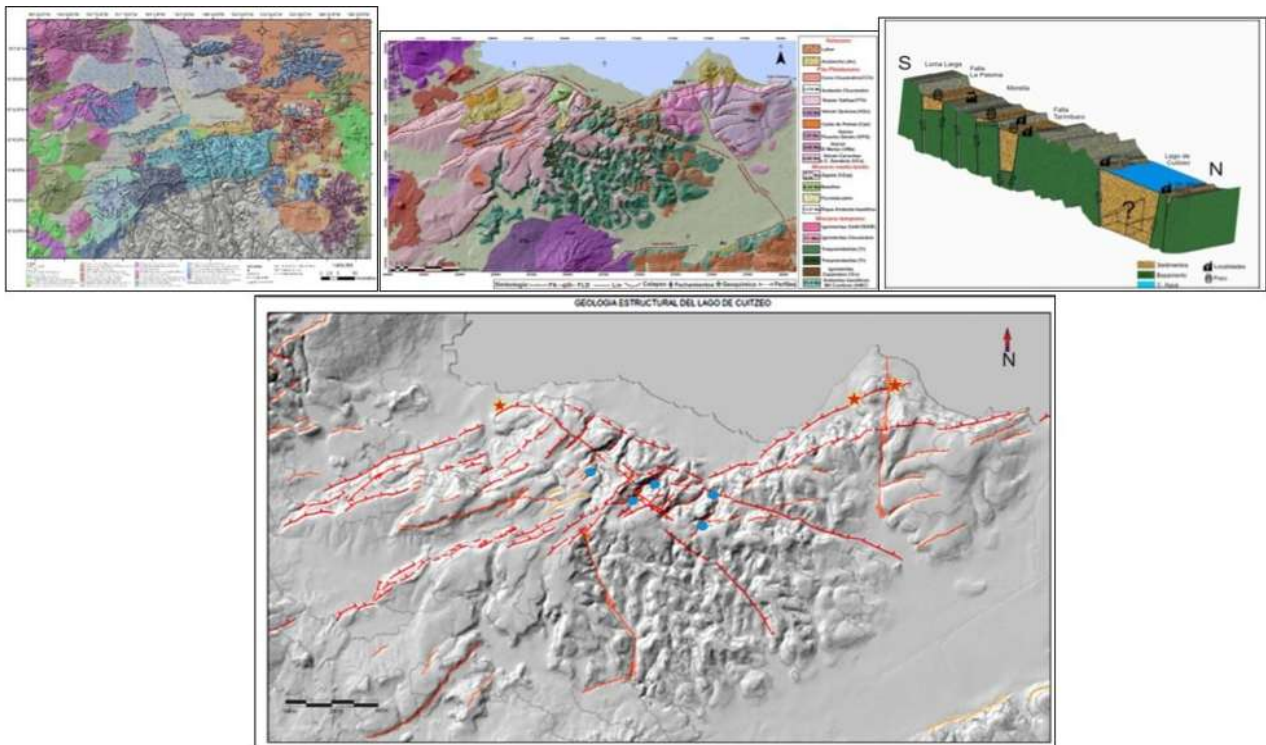


Figura VI.2. En la figura se muestra un ejemplo de la cartografía de fallas generada con imágenes de satélite y bibliografía previa para el sector suroeste del área de estudio (parte inferior), se muestran también algunos resultados importantes de trabajos con los se generó esta información (parte superior, de izquierda a derecha, Trujillo-Hernández 2016, Mennella 2011, y Medina-Vega 2008).



1. Durante el trabajo en campo se corroboraron y localizaron las zonas con potenciales fallas, para determinar áreas con presencia de indicadores cinemáticos, con los que se puedan obtener datos geométricos y cinemáticos de dichas fallas. Aunado a esto se buscaron zonas con minerales neoformados que se encuentren alojados en el plano de falla y en los que se reflejen los indicadores cinemáticos de la falla. De igual manera se identificaron zonas con presencia de fracturas rellenas y zonas de alteración sin fracturamiento evidente, con la finalidad de comparar los resultados de estas con los encontrados en las fallas (Fig. VI.3).



*Figura VI.3. En la figura se muestran fotografías del desarrollo del trabajo en campo en el que se identificaron las estructuras de falla principales a nivel de afloramiento y se identificaron las que se encentraron mineralizadas y con indicadores cinemáticos.*

Identificadas las zonas de interés se realizó una breve descripción del área en que se encontró el afloramiento, en el que se incluyeron las coordenadas geográficas, el tipo de roca en donde se encuentra la falla, los datos estructurales de la falla, toma de fotografías del afloramiento y las muestras a recolectar y haciendo ilustraciones de las fallas y la muestras; haciendo énfasis en la posición de los minerales neoformados con respecto al plano de falla (Fig. VI.4).

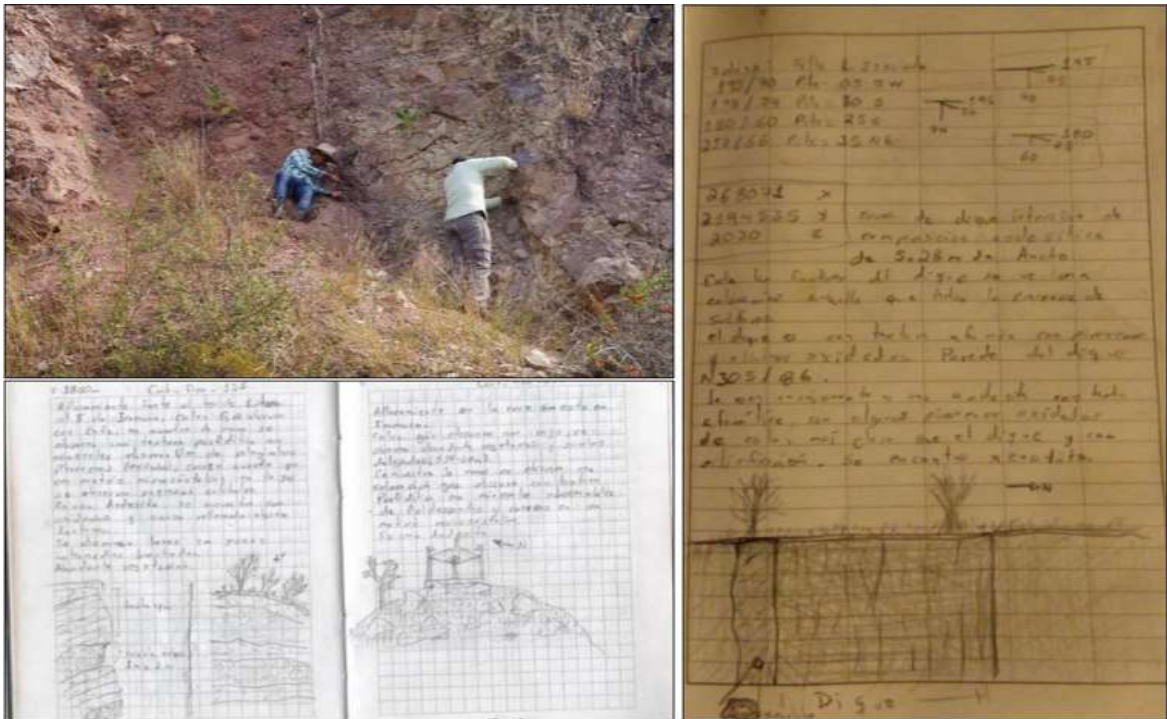


Figura VI.4. En la figura se muestran fotografías del levantamiento estructural en campo y ejemplos de los datos levantados sobre la descripción de estaciones generadas.

Por último la colecta de muestras se llevó a cabo marcando los datos estructurales sobre la muestra a tomar, antes de retirarla para su transporte, esto con la finalidad de que la muestra se encuentre orientada, dato que fue útil para los posteriores análisis en laboratorio. Se almacenó la muestra en bolsas resellables en las que se anotó una clave única para cada muestra, la fecha de colecta, las coordenadas y los datos estructurales del plano en que se tomó la muestra, se incluyó también el nombre de la localidad o de la zona para identificar rápidamente el lugar de muestreo (Fig. VI.5).



Figura VI.5. En la figura se muestran fotografías del marcado de estructuras antes del muestreo, así como el almacenamiento de las mismas.



### VI.II.II.- Preparación de muestras para DRX

En primer lugar de las muestras a analizar, se seleccionó la fracción más pura, con menor alteración por intemperismo y sin presencia de la roca encajonante, realizando una limpieza mecánica de la superficie cuando era necesario, mediante métodos abrasivos o quebrando la muestra para seleccionar la fracción menos alterada (Fig. VI.6). En caso de ser necesario se puede lavar la muestra colocándola en un vaso de precipitado con agua desionizada, dentro de un aparato de ultrasonido, en periodos cortos de vibración para evitar el fraccionamiento de la muestra, desechando el agua después de cada periodo de vibración en el ultrasonido y remplazándola por agua limpia. Posteriormente la muestra se puso a secar por un periodo mínimo de 24 horas en un horno a una temperatura de 60°C, para realizar el siguiente paso.



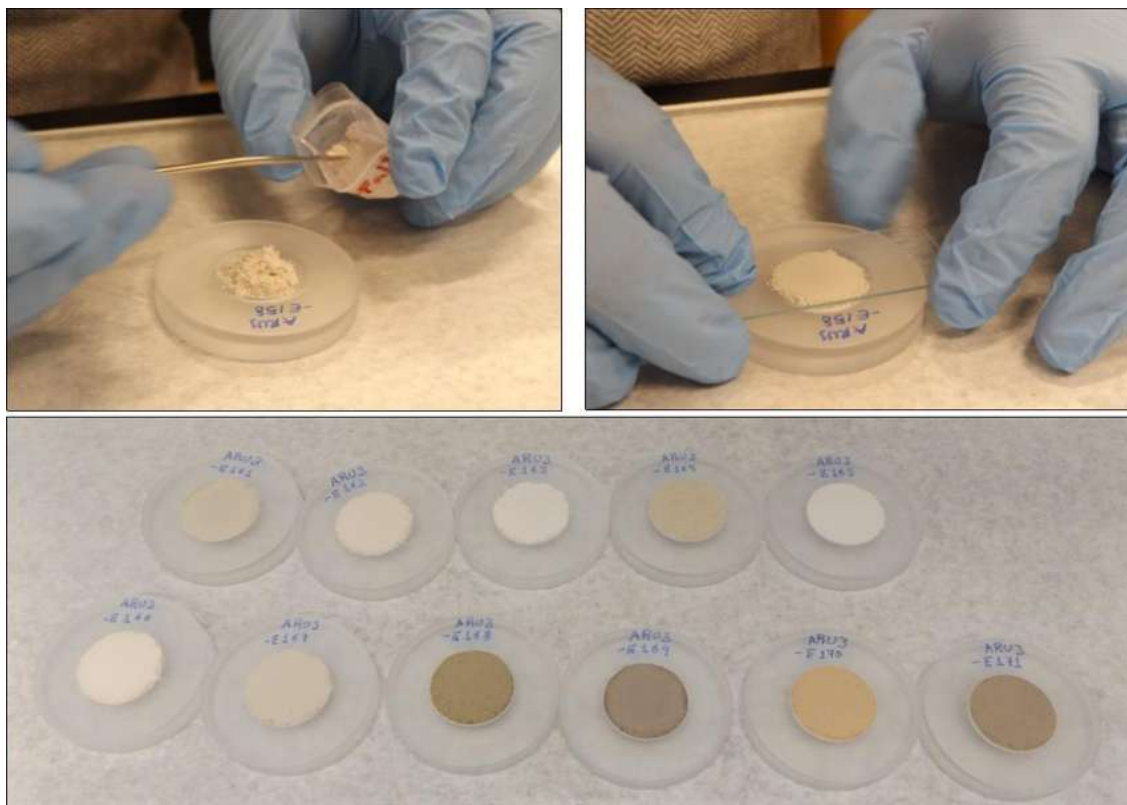
*Figura VI.6. En la figura se muestran fotografías del método de limpieza y selección de muestra mediante el corte de la muestra con un disco de corte con polvo de diamante.*

La muestra seca se trituró en un molino mecánico o a mano en un mortero de jaspe o ágata hasta alcanzar un tamaño de las partículas cristalinas de 20-40 micrones, que una textura en la muestra parecida en tamaño al talco comercial y es el tamaño ideal para que durante el montado de la muestra en los portamuestras (Fig. VI.7), los técnicos de laboratorio generen una superficie homogénea y totalmente horizontal para obtener un difractograma con el menor ruido posible, que facilite la identificación de las especies minerales, mediante el uso de la técnica de polvo desorientado, que nos permite analizar la muestra en su totalidad garantizando un análisis homogéneo de la misma.

La masa normal de muestra necesaria para este tipo de análisis es de 0.5 -1.0 gr., sin embargo, se recomienda enviar al laboratorio una cantidad aproximada de 5gr., ya que esta debe representar la composición general de la muestra y ser homogénea en los tamaños de las partículas cristalina. La muestra deberá ir etiquetada con la clave que se le ha asignado durante la recolección en campo para evitar confusiones en el laboratorio (Fig. VI.8).



Figura VI.7. En la figura se muestran fotografías del montaje de muestra en el molino mecánico de ágata (superior izquierda), el mortero de ágata para molienda manual (superior derecha) y las muestras ya molidas y listas para el montaje en los portamuestras redondos de vidrio para difractometro.



*Figura VI.8. En la figura se muestran fotografías del método de montaje de la muestra para el análisis de DRX, en el que se toma una porción de la muestra para cubrir en su totalidad el espacio central del portamuestra, generando una superficie plana con ayuda de un portamuestra rectangular para microscopio.*

### **VI.II.III.- Preparación de muestras para EIR**

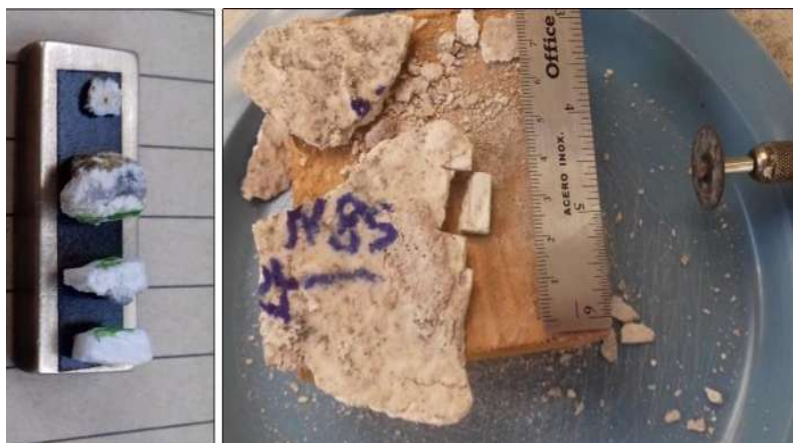
Las muestras a analizar se limpian de la misma manera que las muestras para DRX y se selecciona una fracción de la misma que será pulverizada de manera manual o mecánica en un mortero de jaspe o ágata hasta la fracción de arcillas (20-40 micrones) como se muestra en la preparación para DRX. De la cual se usará una cantidad de 0.003gr de muestra y 0.3gr de bromuro de potasio, para generar mediante compresión una pastilla para este análisis, u otros instrumentos de medición permiten tomar una cantidad menor a 0.5gr, para ser analizada directamente en el espectrómetro de infrarrojos, es por esto que es importante conocer las especificaciones bajo las cuales trabaja el equipo del laboratorio que ha de analizar la muestra (Fig. VI.9).



*Figura VI.9. En la figura se muestran fotografías del montaje de la muestra y el acomodo en el equipo de análisis de Espectroscopia Infrarroja.*

#### **VI.II.IV.- Preparación de muestras para Microscopia electrónica de barrido**

Se realizó una elección de las muestras pertenecientes a fallas con indicadores cinemáticos que se reflejaron en la superficie de los minerales neoformados, y se tomaron las 4 muestras con mayor evidencia visual de un crecimiento mineral favorablemente orientado al campo de esfuerzos indicado por las estrías, a estas muestras se les realizó un corte perpendicular a la orientación de las estrías presentes en la muestra y donde se reflejara el crecimiento mineral de la muestra, con la finalidad de estudiar la orientación del mismo. Se tomaron muestras con dimensiones máximas de 1.5cm en su máxima longitud y con 0.5cm de altura máxima, esto según las indicaciones del técnico del laboratorio de MEB. Una vez cortadas se realizó una limpieza, con aire a presión, de las muestras y se montaron en un porta-muestras metalizado sobre el cual se llevó a cabo un proceso de metalización con cobre de la superficie de las muestras, para realizar el análisis (Fig. VI.10).



*Figura VI.10. En la figura se muestran fotografías del cortado de la muestra (derecha) y el montaje de las muestras en el porta-muestras para llevar a cabo la metalización de las mismas y poder realizar el análisis.*



#### VI.II.V.- Preparación de muestras para Microtomografía

Tras una inspección con la lupa petrográfica de las muestras pertenecientes a fallas con indicadores cinemáticos que se reflejaron en la superficie de los minerales neoformados, se seleccionaron 8 muestras, a las cuales se les realizó una limpieza mecánica de la superficie, mediante un disco de corte diamante, perpendicular a la orientación de las estrías presentes en la muestra, cuidando en todo momento mantener la orientación tomada en campo al recolectar la muestra, el tamaño de la muestra, una vez cortada, se decidió en base a las especificaciones indicadas por el técnico del laboratorio donde se realizaron los análisis (máximo 4cm de ancho por 10cm de alto). Posteriormente se procedió al lavado de la muestra colocándola en un vaso de precipitado con agua desionizada, dentro de un ultrasonido, en periodos cortos de vibración para evitar el fraccionamiento de la muestra, desechando el agua después de cada periodo de vibración en el ultrasonido y reemplazándola por agua limpia (Fig.VI.11). Posteriormente la muestra se colocó durante 24 horas en un horno a una temperatura de 60°C, puestas en papel aluminio con la clave de cada muestra.



*Figura VI.11. En la figura se muestran fotografías de la superficie de una muestra vista con la lupa petrográfica (izquierda) y las muestras ya cortadas y secas, listas para que el técnico pueda llevar a cabo el montaje en los portamuestras para el microtomógrafo.*

### **VI.III.- Equipo**

Durante la realización de la colecta de las muestras fueron utilizados las siguientes herramientas: GPS Garmin modelo 62sc, martillo de geólogo estándar, espátula, cincel, cartas topográficas del INEGI a escala 1:50,000, flexómetro, brújula brunton, lupa.

En la preparación de muestras se realizó la limpieza y corte utilizando un Dremel modelo 300I y un disco de corte con polvo de diamante, en el pulverizado de muestras para DRX y EIR se utilizó un mortero de ágata estándar para el pulverizado manual así como un molino mecánico marca Retsch modelo RS200 para las muestras más resistentes.

El equipo para el análisis de DRX fue un Difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance, bajo el método de “Ensayo de identidad” de polvos con un rango de análisis 10 a 120 2Theta, en un incremento de 0.02, a una resolución de 4 cm<sup>-1</sup> en un tiempo de escaneo promedio de 32 scans. Los análisis cuantitativos fueron llevados a cabo mediante el software DIFFRAC PLUS (de la compañía BRUKER AXS) (Fig. VI.12).

El equipo para el análisis de EIR fue un Espectrómetro de Infrarrojo de la compañía Agilent technologies modelo Cary 630 FTIR, mediante el protocolo de ensayos Espectroscopia de Infrarrojos Transformada de Fourier por Reflectividad Total Atenuada (FTIR-ATR) con un rango de análisis 600cm<sup>-1</sup> a 4000cm<sup>-1</sup>, a una resolución de 2cm<sup>-1</sup> y 300 barridos por muestra. Los análisis cuantitativos se realizaron mediante el software Agilent MicroLab (de la compañía Agilent Technologies) (Fig. VI.12).



*Figura VI.12. En la figura se muestran el equipo Difractómetro de rayos X Bruker D8 Advance (izquierda) y el Espectrómetro de Infrarrojo de la compañía Agilent technologies modelo Cary 630 FTIR (derecha) ambos utilizados durante los análisis de laboratorio, para la determinación de las especies minerales.*

El equipo para el análisis de Microscopia electrónica de barrido utilizado fue un microscopio de barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F FEG-SEM, con una resolución de hasta 1nm. Las muestras fueron metalizadas con una metalizadora “Sputter-Coater” (Fig. VI.13).

Para el estudio de Microtomografía se utilizó un estéreo-microscopio Zeiss Stemi 305 para la inspección inicial de las muestras y un nanotomograma de rayos X Multiscale Skyscan 2211 de la compañía Bruker, mediante la aplicación de escaneo y reconstrucción 3D no destructiva de la microestructura interna de objetos (Fig. VI.13).



*Figura VI.13. En la figura se muestran el equipo microscopio de barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F FEG-SEM (izquierda) y el nanotomografo de rayos X Multiscale Skyscan 2211.*



## **CAPÍTULO VII. RESULTADOS**

### **VII.I Geología**

Al igual que el presente trabajo la generación de la cartografía geológica y estratigrafía a detalle de la zona de estudio se realizó como parte del proyecto número 17 del CeMIE-Geo, en estudios que se han desarrollado a detalle en diferentes sectores en el Lago de Cuitzeo. A continuación se describen los resultados de estos trabajos y se detallan por sectores:

#### **1. Sector Noroeste:**

En este sector se describen ocho secuencias volcánicas siendo la más antigua la que conforman los depósitos de los basaltos Villa Morelos, con una edad estimada de 6.0 Ma., que se localizan al noroeste del Lago de Cuitzeo. A estos se les sobreponen los depósitos ignimbríticos de la secuencia El Terrero, ubicada en la localidad con el mismo nombre y que tiene una edad estimada de 6.1 Ma. sobreyaciendo al nivel anterior se encuentran los depósitos de las Ignimbritas Laguna de Cuitzeo, con una edad estimada en 2.8 Ma., que afloran en la península de Cuitzeo y al NW de la misma. Sobre las anteriores se encuentran los conos de lava andesítico con edades de entre 2.9 a 1.3 Ma. y que tienen sus principales representantes en el Cerro Manuna y al oeste del lago. Posteriormente se encuentran los domos dacíticos y riolíticos Villa Madero, que se localizan en la península de Cuitzeo y al oeste y norte del Cerro Manuna. Posteriormente se encuentran los conos de lava y pequeños volcanes en escudo de edades que van de 1.3 a 0.83 Ma., que se localizan al este del lago. Estratigráficamente sobre el anterior están los Basaltos de la Laguna de Cuitzeo con una edad de entre 0.87 a 0.75 Ma. y que afloran principalmente en la península de Cuitzeo. Por último encontramos los volcanes monogenéticos con edades menores a 0.5 Ma., pertenecientes al Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato que se localizan en el norte de la península de Cuitzeo.

#### **2. Sector Suroeste:**

En este sector se han descrito el basamento y siete secuencias volcánicas pertenecientes al área que incluye los campos geotérmicos de San Agustín del Maíz y Chucándiro. Se ha interpretado un basamento de tipo granítico con base

en xenolitos encontrados en la denominada Ignimbrita de Chucándiro, estimando una edad del mismo de entre 48 a 34 Ma. La secuencia volcánica más antigua que aflora en superficie es la denominada Secuencia Mil Cumbres con una edad estimada de 21.5 Ma., se caracteriza por una litología propia de andesitas basáltica con un alto grado de alteración color rojo, café y morado, con una textura afanítica y la presencia de minerales secundarios de cuarzo, aflorando principalmente al Sur del área de estudio. Sobreyaciendo a la anterior se encuentra la Secuencia Copándaro representada por ignimbritas con un alto contenido de minerales secundarios como calcita y zeolitas, con minerales de cuarzo, feldespato, anfíbol, biotita, pómez alargada y líticos accidentales y juveniles de composición intermedia de tamaño lapilli fino a medio, esta secuencia aflora principalmente al Este del área de estudio. Sobre esta última se localiza la Secuencia Tarímbaro con una edad de 18.6 Ma, representada por dos unidades litológicas; 1) Andesitas basálticas que presentan un color verde por alteración hidrotermal, con una textura porfídica con matriz afanítica, los fenocristales son principalmente de olivinos y piroxenos alterados de color rojo. 2) Traquiandesitas de un color gris oscuro, con textura afanítica en la que se logran apreciar microfenocristales de piroxenos de color rojo. La secuencia que sobreyace a la anterior es la Secuencia Chucándiro, compuesta por tres unidades ignimbríticas, la primer unidad es la Ignimbrita Rosa, caracterizada por un nivel de brecha de rezago con sesenta por ciento de bloques angulosos y subangulosos de andesita color gris oscuro morado, escoria color naranja y rojo e ignimbritas vitrificadas de color morado tamaño lapilli fino a grueso soportados en una matriz color café claro con minerales de cuarzo, óxidos, feldespato potásico y pómez color verde. La segunda unidad de Ignimbrita es la Ignimbrita Blanca con una matriz de tamaño ceniza fina a medio con líticos color gris. Se lograron identificar minerales de hornblenda, cuarzo, fenocristales de plagioclasa y óxidos. La ultima unidad de ignimbrita es la Ignimbrita Morada con presencia de pómez color gris claro en muestra sana y en muestra alterada con pómez de color café claro tamaño lapilli medio con minerales de cuarzo, plagioclasa, óxidos, feldespato potásico y anfíbol. Esta última secuencia es sobre yacida por la Secuencia San Agustín del Maíz que se caracteriza por una serie de depósitos de flujo piroclástico de pómez soldados y no soldados, oleada secas, diques y flujos de lavas de andesita basáltica. Los depósitos mejor expuestos afloran al

sur del poblado de San Agustín del Maíz, en donde se encuentran las principales manifestaciones hidrotermales que caracterizan al campo geotérmico de la zona de estudio. La denominada Secuencia Santa Rita sobre yace estratigráficamente a la anterior y se caracteriza por estar compuesta por tres unidades, la más antigua corresponde a un dique con una edad de 13.96 Ma. y que con estudios petrográficos y geoquímicos fue determinado como un dique de andesita basáltica, seguido por una unidad de lavas basálticas que en superficie presentan un color gris oscuro con textura afanítica y vesicular, presentando minerales de olivinos alterados y plagioclasas. La última secuencia es la Secuencia Volcanes Monogenéticos que es representada por estructuras volcánicas de pequeñas y grandes dimensiones, destacando en la zona de estudio el Volcán Zapata, Volcán Marijo y el Cono Chucándiro.

### 3. Sector Sureste:

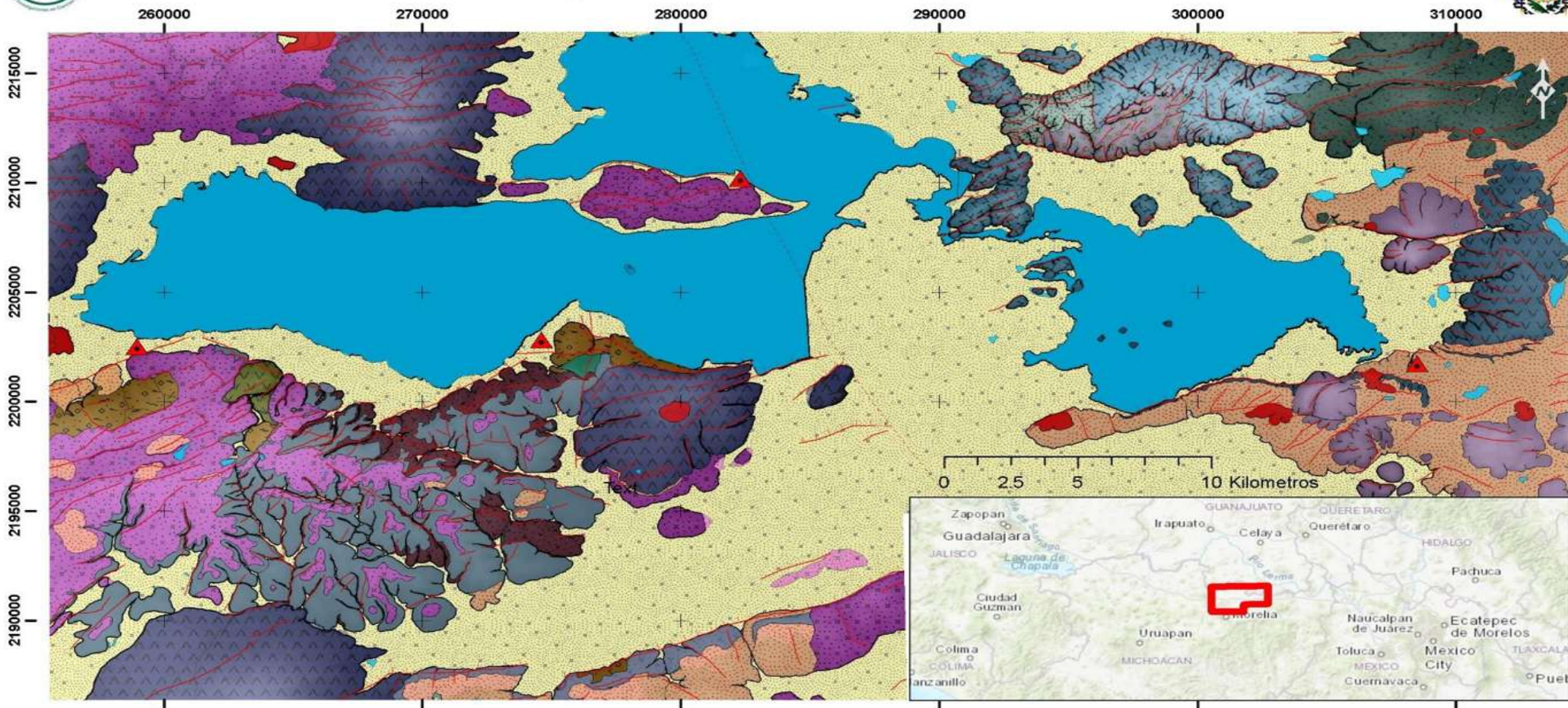
Es en este sector en el que se encuentra el campo geotérmico de Araró y se describen seis secuencias volcánicas. La andesita de Mil Cumbres conforma el basamento de la región, estas se conforman por coladas de lava de un color gris oscuro, con minerales ferromagnesianos oxidados, presentando un alto grado de fracturamiento y aflorando principalmente en las cercanías de la comunidad de Belisario Domínguez. Seguida de depósitos de lavas andesíticas Puente Blanco pertenecientes al vulcanismo andesítico al este del área de Araró. A estas le sigue la actividad riolítica que se localiza principalmente al este de la comunidad de Andocutín y en la Mesa el Palillo, presentándose como domos de composición riolítica-dacítica de edades alrededor de los 1.7 a 1.3 Ma, presentando una resurgencia en la Mesa el Palillo con una edad de 0.81Ma. y cuya cámara volcánica se considera como la fuente de calor para el campo geotérmico de Araró. Estratigráficamente le sigue una secuencia piroclástica que se localiza en toda la porción este del lago presentando una composición ácida con depósitos ricos en pómez, con espesores de hasta 36m. Sobreyaciendo los anteriores se encuentran los eventos andesíticos, ligados al vulcanismo monogenético cercano a San Bartolomé Coro con una edad de entre 1.1 a 1.5 Ma. Por último se encuentra el vulcanismo basáltico perteneciente al campo volcánico Michoacán-Guanajuato, caracterizado en esta zona por volcanes tipo cono de escoria con edades que rondan los 1.7Ma.

#### 4. Sector Noreste:

En este sector se describen siete unidades volcánicas considerando como basamento la unidad andesítica de Mil Cumbres, la cual se encuentra afectada por múltiples fracturas y tiene una edad estimada de 22-17Ma (Pascuare et al. 1991), esta unidad presenta un alto grado de alteración hidrotermal y aflora principalmente el Noreste de la localidad de Puerto de Cabras, Mich. Sobreyaciendo esta unidad se encuentra la unidad del vulcanismo diorítico el cual está afectado por tres principales sistemas de fallas N-S, E-W y NE-SW; se encontraron edades para esta unidad de entre 13.9 y 15.6 Ma. Y se localiza en la parte central de la Sierra San Andrés (SSA), con una mineralización y alteración hidrotermal alta. Continuando la secuencia estratigráfica encontramos la secuencia de la denominada Andesita San Andres, que se caracteriza por sus grandes niveles de roca masiva que se intercalan con lavas autobrechadas que evidencian diferentes pulsos de actividad volcánica. Contemporánea a la secuencia anterior se considera un depósito masivo Riolítico localizado al noreste de la comunidad de Puerto de Cabras, Gto. La cual presenta una alteración hidrotermal intermedia y está afectada por fallas N-S principalmente, se encontró una edad para éste de 15.0 Ma. Al este del anterior se localiza un cuerpo intrusivo de composición andesítica que se ha fechado en 13.0 Ma., emplazándose sobre una estructura de falla NW-SE que entra en contacto con la unidad Diorítica y Riolítica. Con una edad de entre 15.2 y 14.0 Ma. encontramos las formaciones correspondientes al vulcanismo andesítico de Iramuco, que se localiza en el borde norte del lago, al sur y oeste de la SSA; presentando una alineación preferencial E-W y caracterizándose por estructuras volcánicas tipo domo y coladas de lava de composición andesítica. Por último se encuentra la unidad Andesítica-Basáltica caracterizada por la formación del C. la Tortuga ubicado en el límite este de la zona noreste el Lago de Cuitzeo, obteniendo en fechamientos para ésta de entre 2.5 a 2.7 Ma. lo que la convierte en el último episodio volcánico en este sector.



# Mapa Geológico-Estructural del Lago de Cuitzeo



Legenda				
Campo Geotermico	Cuerpo de agua	Conos cineriticos	Vulcanismo Andesitico-Basaltico	Intrusivo Dioritico
Falla	Aluvion	Depositos de caida	Traquiandesitas	Ign. Jamaica
Fractura	Volcanoclasticos	Andesitas Araró	Intrusivo Andesitico	Andesitas Tarimbaro
Falla Tzitzio	Semiescudos	riolitas	Ign. Chucandiro	Andesitas Rio Chiquito
			Andesitas Sierra San Andres	Andesita Mil Cumbres

Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
 Proyección: Mercator Auxiliary Sphere  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Metros  
 Elaboro Ing. Addí E. Maciel Rivera

Figura VII.1. Mapa Geológico de la zona de estudio. (Pasquare et al, 1991, Rentería-Ortega, 2015. Maciel-Rivera, 2015, Trujillo-Hernández 2016).



## VII.II ESTRUCTURAL

Durante la parte inicial de este trabajo y con apoyo del trabajo de campo se obtuvo un mapa con las principales estructuras que afectan la zona de Cuitzeo, en este se resaltan las fallas regionales del SFMA, el sistema de fallas Norte-Sur y Noreste-Suroeste.

A continuación se presenta el mapa estructural de la zona de estudio en él se muestran las principales estructuras de falla encontradas durante el trabajo de gabinete y campo, así como los puntos de muestreo que se levantaron durante el trabajo de campo (Fig. VII.2).



Figura VII.2. Mapa estructural de la zona de estudio en el que se identifican las principales estructuras geológicas que se localizaron en el área así como los diagramas rosa correspondientes a las cinco regiones de muestreo en que se dividió la zona: Región Suroeste de color verde, Región Oeste de color azul marino, Región Centro de color amarillo, región Norte de color azul cielo y por último la Región Este de color naranja.

Los datos estructurales obtenidos de las campañas de trabajo de campo se agruparon en cinco regiones con la finalidad de obtener un panorama local de las direcciones preferenciales en las estructuras medidas durante la toma de muestras en los diferentes puntos de muestreo, esto principalmente por la gran extensión de la zona y la dispersión de los puntos de muestreo.

## 1.- Región Suroeste

Se caracteriza principalmente por la presencia de la Falla Tarímbaro de dirección general Este-Noreste y Oeste-Suroeste (Fig. VII.5), con un plano de falla de rumbo  $52^{\circ}\text{NE}$ , inclinación  $81^{\circ}$  y *pitch* de  $85^{\circ}$  que buza al norte, desplazando a la secuencia volcánica de las andesitas Mil Cumbres y sobre la cual se localizaron 11 puntos aptos para el muestreo, los resultados de los datos estructurales obtenidos de fallas normales con planos de falla con un rumbo  $21^{\circ}\text{NW}$ , inclinación de  $54^{\circ}$  y *pitch* de  $81^{\circ}$  que buzan al Noreste evidencian la presencia de un sistema de esfuerzos presentes en la zona con una dirección Noroeste-Sureste (Fig.VII.2), estas estructuras son cortadas por fallas de rumbo  $30^{\circ}\text{NE}$  con inclinación de  $81^{\circ}$  y *pitch* de  $02^{\circ}$  con de dirección Noreste-Suroeste con un desplazamiento de tipo lateral izquierdo que se han asociado al campo de esfuerzos del SFMA (Fig. VII.3).

En los planos de fallas de esta región se lograron identificar rellenos minerales con indicadores cinemáticos pertenecientes tanto a las fallas normales como de las laterales siendo estos últimos los que desplazan a los normales, ayudando a determinar una temporalidad en los eventos, evidenciando que la actividad de las fallas normales es la más antigua (Fig. VII.4).

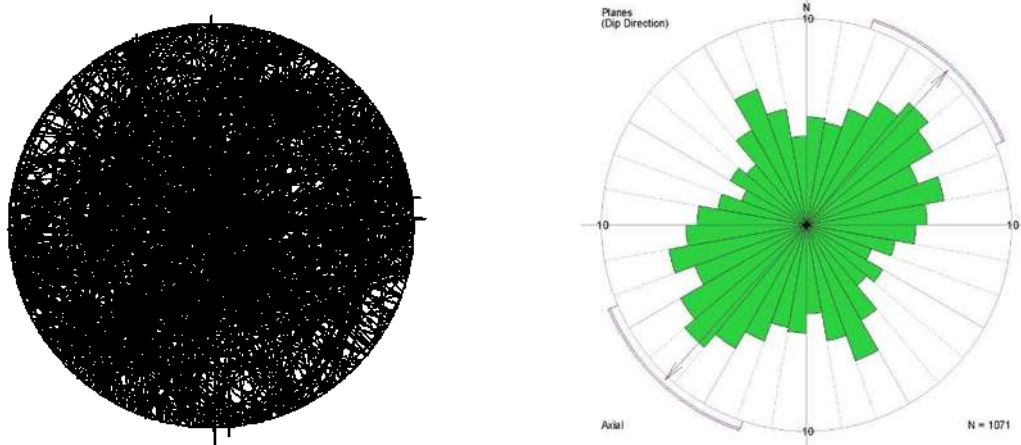


Figura VII.3. En la imagen de la izquierda se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla Tarímbaro y las fallas N-S que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.



Figura VII.4. En la izquierda se muestra una fotografía de los planos muestreados en la Falla Tarimbaro, en el punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-4 (Fig. VIII.4), en los cuales se observa el cruce entre las estructuras Norte-Sur y las Noreste-Suroeste, ambas con rellenos minerales en los que se conservaron indicadores cinemáticos. En la derecha se muestra una fotografía del plano de falla en la que se observan estrías horizontales que evidencian el movimiento lateral de la falla.

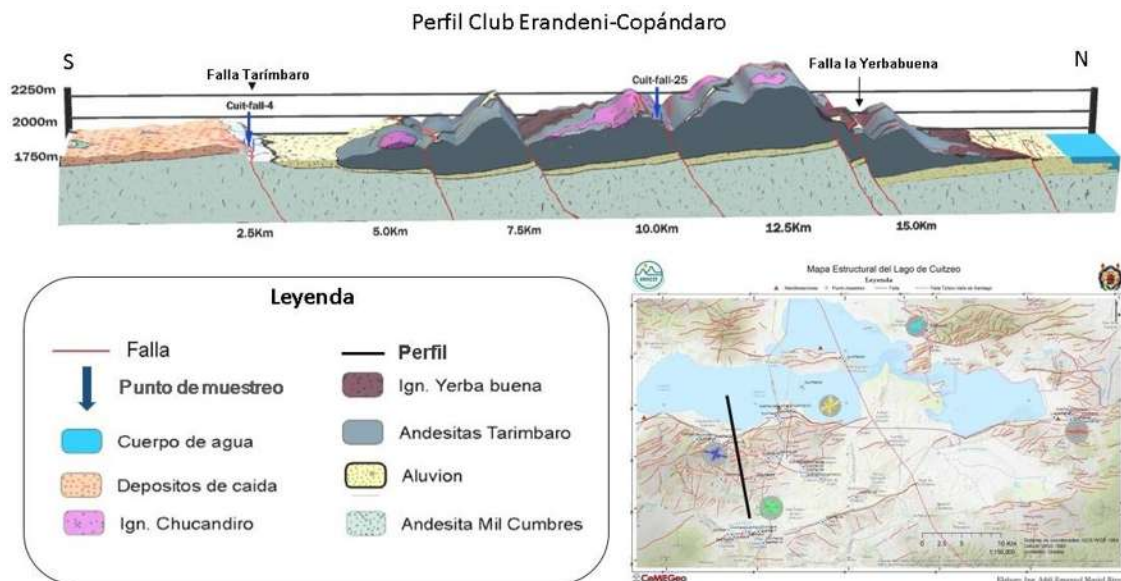


Figura VII.5. Perfil geológico estructural en que se muestran las principales fallas en el Región Suroeste así como su relación con las fallas de la Región Oeste y puntos de muestreo.



## 2.- Región Oeste

Esta región se caracteriza por la presencia de la Falla la Yerbabuena con una dirección preferencial Noroeste-Sureste (Figuras VII. 5 y VII.7), con un plano de falla de rumbo  $02^{\circ}\text{NW}$ , una inclinación de  $83^{\circ}$  y un *pitch* de  $30^{\circ}$  que buza al Noreste desplazando la secuencia volcánica de las Andesitas Mil Cumbres, Andesitas Tarímbaro y las Ignimbritas La Yerbabuena. En esta zona se generaron 12 puntos de muestreo a lo largo y los alrededores de la estructura de Falla la Yerbabuena, los resultados estructurales (Fig. VII.6) evidenciaron un gran dominio del sistema con dirección preferencial Este-Oeste-Noroeste-Sureste asociadas al SFMA, con un desplazamiento lateral Izquierdo con un componente normal y en segundo lugar estructuras Noreste Sureste de tipo normal con buzamiento al Oeste.

En los planos de fallas de esta región se lograron identificar rellenos minerales con indicadores cinemáticos pertenecientes principalmente a fallas laterales izquierdas con componente normal, con un plano de falla buzando al Norte y un rumbo preferencial Este-Oeste. Así mismo se localizó una zona de brecha de falla de dirección preferencial Norte-Sur y algunas fallas normales Norte-Sur con buzamiento al oeste (Fig. VII.8).

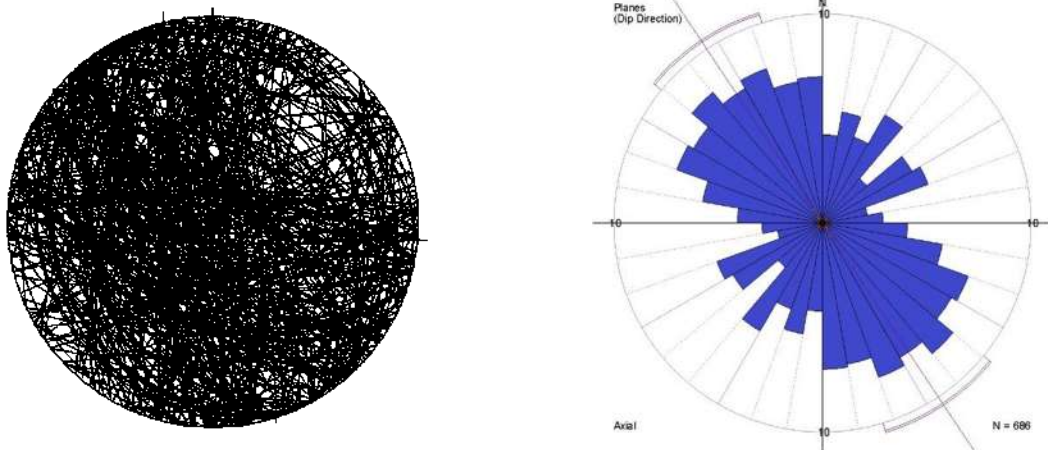


Figura VII.6. En la imagen de la izquierda se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla la Yerbabuena y las fallas N-S que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.



Figura VII.7. En la imagen de la izquierda se observa una de las fallas Norte-Sur que pone en contacto un depósito de lavas con composición andesítica y un depósito ignimbrítico correspondiente al punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-13 (Fig. VII.2). Del lado derecho se observa un plano de falla con depósitos minerales en su superficie y el cual tiene una dirección preferencial Este-Oeste correspondiente al punto de muestreo Cuit-fall-14 (Fig. VII.5).

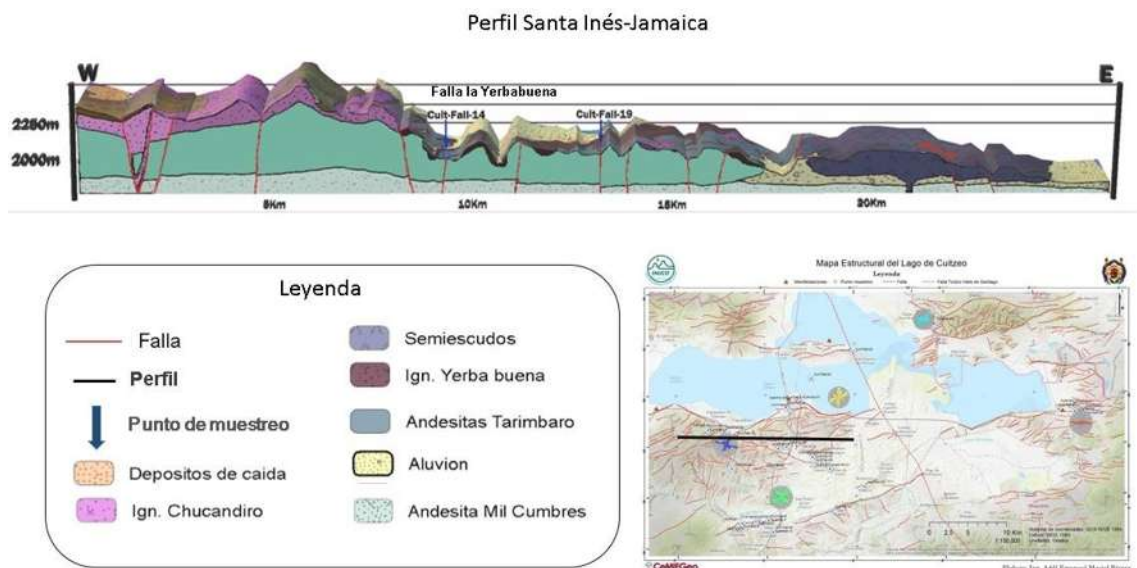
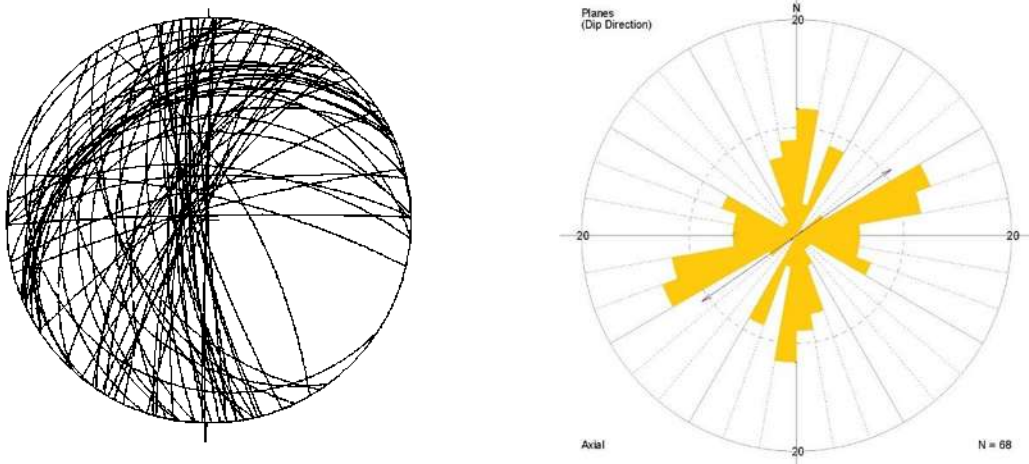


Figura VII.8. Perfil geológico-estructural en el que se muestra un corte transversal de la zona perteneciente a la Región Oeste, así como sus principales estructuras de falla y puntos de muestreo.

### 3.- Región Centro

En esta región se generaron siete puntos de muestreo localizados la mayoría en los alrededores de la principal estructura que es la Falla San Agustín del Maíz, la cual presenta un rumbo de dirección preferencial Noreste-Suroeste, con un plano de falla de rumbo  $46^{\circ}\text{NE}$ , una inclinación de  $82^{\circ}$  y un *pitch*  $35^{\circ}$  de que buza al Noroeste y se extiende en superficie desde el poblado de San Juan Benito Juárez hasta Copándaro y sobre la taza de esta falla a la altura del poblado que le da su nombre, se localiza la zona de manifestación hidrotermales de San Agustín del Maíz, la cual en trabajos como el de Olvera –García en 2017, se ha demostrado la relación del campo de esfuerzos con la presencia de las manifestaciones hidrotermales. Los datos estructurales obtenidos en esta zona (Fig. VII.9) evidencian la alta influencia del SFMA en la zona al dominar las estructuras Este-Oeste y Noreste-Suroeste con desplazamiento de tipo lateral izquierdo con componente normal, además del sistema Norte-Sur que genera estructuras de tipo normal.

En esta región identificaron rellenos minerales principalmente en fracturas, con un plano buzando al Norte y un rumbo preferencial Este-Oeste. Así mismo se localizó una zona de alteración con rumbo Este-oeste en la Isla de las Serpientes.



*Figura VII.9. En la imagen de la izquierda se observa un estereograma generado con los datos estructurales del plano de la Falla San Agustín del Maíz y las fallas que la cortan. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.*





Figura VII. 10. Imágenes de los puntos de muestreo etiquetados como Cuit-fall-27 (izquierda) y Cuit-fall-37 (derecha).

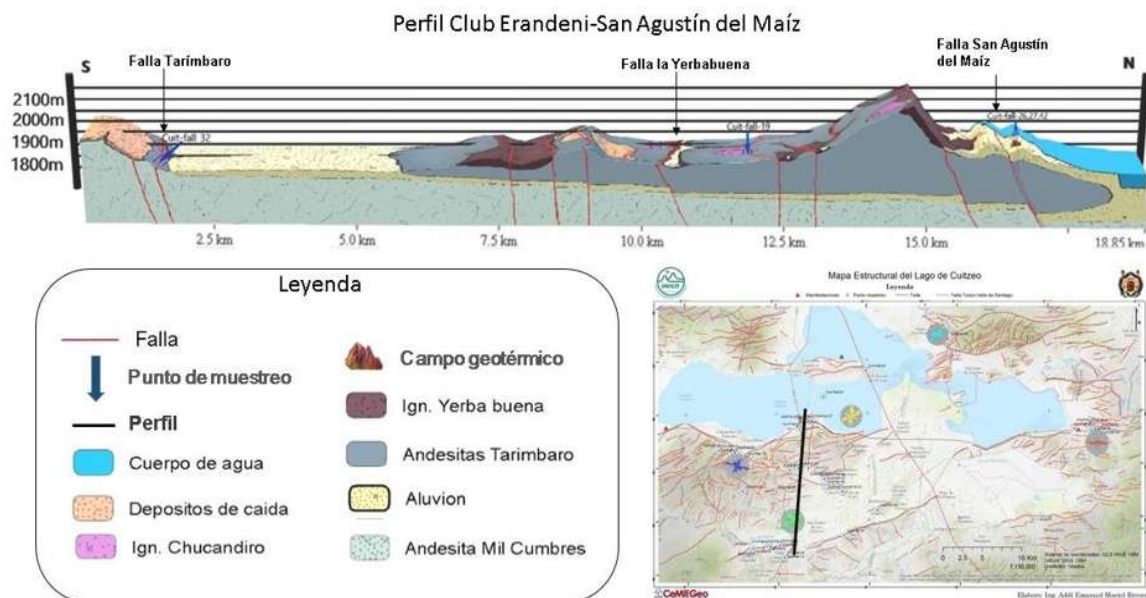
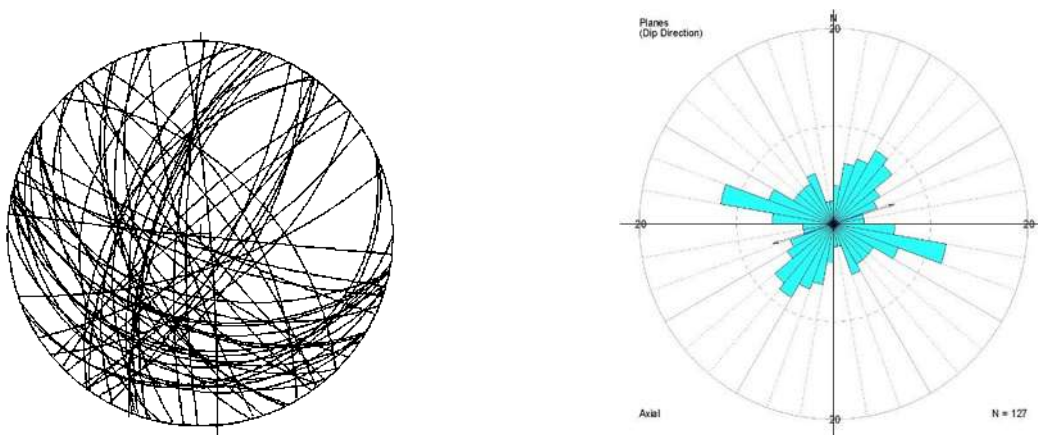


Figura VII.11. Perfil geológico-estructural en el que se muestra un corte de dirección Norte-Sur, en el cual cruzan las fallas Tarimbaro al Sur y la falla La Yerbabuena y la Falla San Agustín del Maíz, con el campo geotérmico del mismo nombre.

#### 4.- Región Noreste

En esta región se generó solo un punto de muestreo para análisis mineralógico, por la falta de zonas que presentaran relleno mineral sin embargo en varios puntos en el área se realizaron toma de datos estructurales (Fig. VII.12); la principal estructura en la zona es la Falla Puerto de Cabras la cual se localiza en el límite sur de la Sierra de San Andrés, Guanajuato y que conforma el límite Norte del Graben de Cuitzeo (Fig. VII.14), esta estructura presenta una dirección preferencial Este-Oeste, con un desplazamiento de tipo normal con un componente lateral izquierdo y el plano de falla buza al Sur. Los datos estructurales medidos en la zona evidencian la alta presencia de estructuras secundarias con dirección Noreste-Suroeste, y estructuras Este-Oeste, generadas en respuesta al campo de esfuerzos propios del SFMA.

En la región se realizó el muestreo en una zona de alteración, en la cual las diversas fracturas presentaban mineralización secundaria (Fig. VII.13).



*Figura VII.12. En la imagen de la izquierda se observa un estereograma generado con los datos estructurales del punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-29. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.*





Figura VII.13. En la imagen de la izquierda se muestra el afloramiento del punto de muestreo etiquetado como Cuit-fall-29, así mismo en la imagen de la derecha se observa un acercamiento a las fracturas rellenas en esta zona.

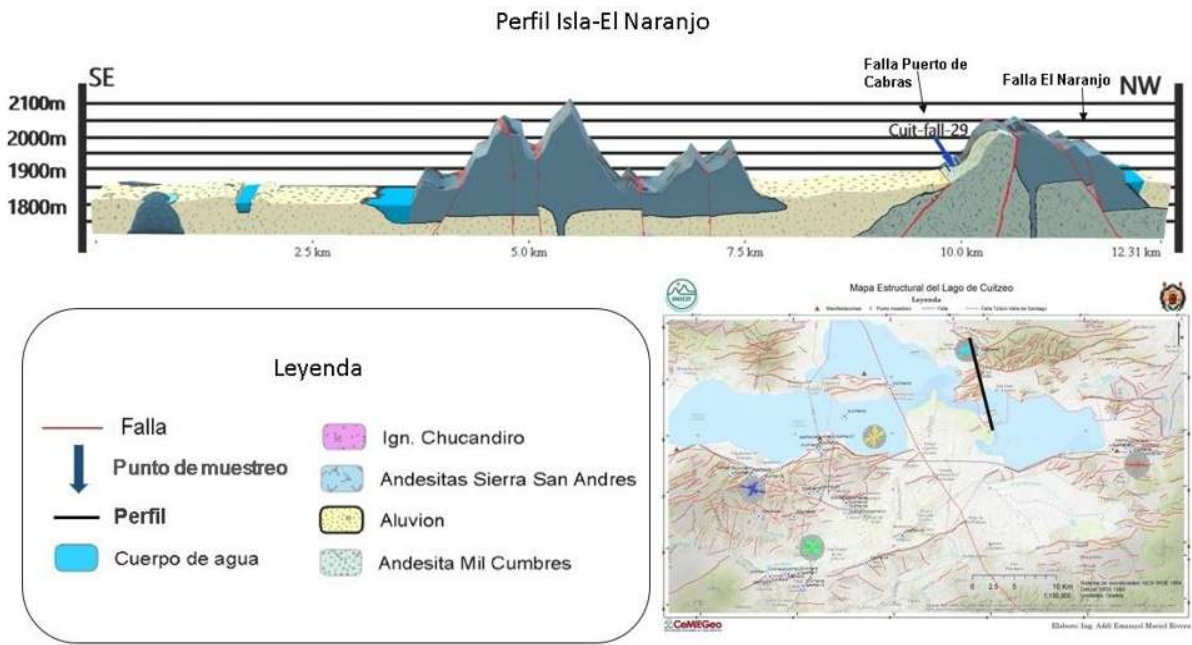
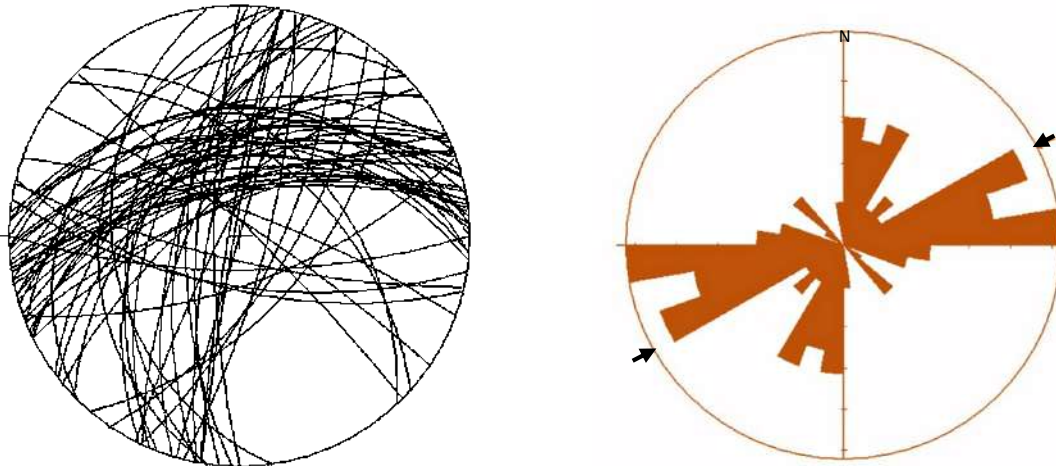


Figura VII.14. Se muestra en la imagen un perfil Geológico-estructural en el que se destacan la presencia de la Falla Puerto de Cabras Y la Falla el Naranjo que constituyen la porción Sur y Norte respectivamente del denominado Horst de Santa Ana Maya que conforma el limite Norte del Garben de Cuitzeo.

## 5.- Región Este

En la Región Este se generaron seis puntos de muestreo sobre todo en las cercanías y sobre las estructuras más importantes (Fig. VII.15), las cuales son el Graben de Araró y la Falla Araró-Zimirao ambas con un rumbo preferencial Este-Oeste, esta última presenta un plano de falla con rumbo  $75^{\circ}\text{NW}$ , una inclinación de  $87^{\circ}$  y un *pitch* de  $87^{\circ}$  que buza al Noreste y presenta el límite Sur del Graben de Cuitzeo. Los datos estructurales recolectados en la zona presentan un muy amplio dominio de las estructuras con dirección Este-Oeste asociadas al SFMA.

En la región se realizó un muestreo en Fallas laterales izquierdas y en las fallas normales que conforman el Graben de Araró, así como en uno de los depósitos hidrotermales del campo geotérmico de Araró.



*Figura VII.15. En la imagen de la izquierda se observa un estereograma generado con los datos estructurales del Graben de Araró. A la derecha se observa su diagrama de rosas correspondiente.*



Figura VII.16. En las imágenes se muestra el punto de muestreo con la etiqueta nombrada Cuit-Fall-3, en la izquierda se observa el aforamiento principal con una fractura rellena y a la derecha un acercamiento a los minerales secundarios muestreados.



Figura VII.17. Se muestra en la imagen un perfil geológico-estructural con un corte Norte-Sur, en el cual se muestra la distribución de las principales fallas en el Sector Este de la zona de estudio así como la localización de algunos puntos de muestreo en la región.



### **VII.III. Mineralogía**

Se realizó para la presente investigación la caracterización mineralógica de 43 muestras de minerales secundarios encontrados en fracturas, fallas, zonas de alteración y depósitos termales recientes, recolectadas en las diferentes regiones de la zona de estudio (Fig. VII.18), además de una muestra de la región de Acambay, Estado de Mexico la cual se ubica fuera de la zona de estudio y que a pesar de pertenecer al SFMA, en ésta no se han encontrado evidencias de actividad hidrotermal reciente por cual se tomara como muestra de control para comparar con los resultados obtenidos en la zona de estudio. El muestreo se llevó a cabo en diferentes zonas, lo cual originó la regionalización de las muestras para facilitar el manejo de los datos estructurales y mineralógicos.

A continuación se presentan en una tabla los datos de los puntos de muestreo generados durante el trabajo de campo con su respectiva localización geográfica con las coordenadas en el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator, en la zona 14Q Norte; así como características estructurales (Tab. 1). De igual manera se presentan los mismos puntos con los resultados de la caracterización mineralógica de las muestras, obtenidos mediante el método analítico de Difracción de rayos X y Espectroscopia infrarroja (Tab. 2).

Clave	Lugar de Muestreo	X	Y	Tipo	Rumbo	Echado	Pitch
Cuit-Fall-1	Sur de Araró	309800	2202289	Fractura	N80E	80NW	
Cuit-Fall-2	Puente Araró	310974	2201687	Falla Normal	N71W	84 NE	
Cuit-Fall-3	Grabén de Araró	309761	2202268	Falla Normal	N75W	87NE	87NE
Cuit-Fall-4	Oeste de San José	270949	2187775	Falla Izquierda	N30E	81NW	95E-W
Cuit-Fall-5	Oeste de San José	270948	2187775	Falla Izquierda	N52E	84SE	02NE
Cuit-Fall-6	Oeste de San José	270950	2187775	Fractura	N09E	85SE	
Cuit-Fall-7	Oeste de San José	272462	2187838	Falla Normal	N21W	54NE	81SE
Cuit-Fall-8	Oeste de San José	271323	2187782	Falla Derecha	S21W	76NE	29NE
Cuit-Fall-9	Poblado de San José	272462	2187838	Falla Derecha	S72W	61NW	37NE
Cuit-Fall-10	Falla Tarimbaro	269269	2187516	Fractura	N04E	65SE	
Cuit-Fall-11	Falla Tarimbaro	269268	2187516	Zona de Alteracion	N20E		
Cuit-Fall-12	Puente club Erandeni	272954	2186333	Fractura	N81W		90
Cuit-Fall-13	Ignimbrita verde, la Yervabuena	267124	2199406	Falla Normale	N-S		
Cuit-Fall-14	Autopista Cuitzeo-Patzcuaro	267568	2199077	Falla Izquierda	E-W		
Cuit-Fall-15	Falla La Llervarbuena	268478	2198622	Falla Normal	E-W		
Cuit-Fall-16	Puente de autopista Cuitzeo-Patzcuaro	265045	2199671	Brecha de Falla	E-W		
Cuit-Fall-17	Puente de autopista Cuitzeo-Patzcuaro	265223	2199594	Falla Secundaria	S50E	85NE	
Cuit-Fall-18	Afloramiento en CECYTE, fractura rellena	284222	2192092	Falla Fractura	S88W	73NW	
Cuit-Fall-19	Santa Cruz	273777	2197104	Falla Normal/Izquierda	S81E	87NE	18SE
Cuit-Fall-20	Tejaro	280046	2194380	Fractura	N59E	82NW	
Cuit-Fall-21	Tejaro	280046	2194380	Falla derecha	N15E	89NW	17NE
Cuit-Fall-22	Fracturas en Autopista Cuitzeo-Patzcuaro	267167	2199405	Falla Izquierda	E-W		90
Cuit-Fall-23	Zona de alteracion Isla de las Serpientes	277902	2206054	Zona de alteracion	E-W		
Cuit-Fall-24	Zona de alteracion en San Agustin del pulque	283016	2209232	Zona de alteracion			
Cuit-Fall-25	Noroeste del Arroyo el Tlacuache	268071	2194535	Falla Izquierda	S15W	70NW	05SW
Cuit-Fall-26	Fracturas bajo el trebol en autopista de SAM	275062	2203071	Fractura	N46E	57NW	
Cuit-Fall-27	Sur de la Manifestacion "nueva" en SAM	274930	2202162	Zona de Alteracion			
Cuit-Fall-28	Noroeste de Tarimbaro	272063	2194445	Fractura	N70W	87NE	
Cuit-Fall-29	Relleno al Norte de puerto de Cabras.	292935	2213008	Zona de Alteracion			
Cuit-Fall-30	Ignimbritas de Jamaica	277940	2195974	Falla Normal	N-S	84W	80NE
Cuit-Fall-31	San Juan Benito Juarez	276531	2203117	Falla Izquierda	E-W	82N	12NE
Cuit-Fall-32	Puente Club Erandeni	272988	2186386	Fractura	S45E	21SW	
Cuit-Fall-33	Ignimbritas de Jamaica B	277940	2195974	Falla Normal			
Cuit-Fall-34	Autopista Araró	310974	2201687	Falla Normal	N71W	84NE	74NE
Cuit-Fall-35	Zona de Opalos Cuto	274767	2197327	Falla Normal	E-W	82W	80NW
Cuit-Fall-36	Ingimbritas de Jamaica	277940	2195974	Fractura	E-W		
Cuit-Fall-37	San Juan Benito Juarez	276534	2203122	Fractura	E-W		''
Cuit-Fall-38	Jamaica A	277940	2195974	Falla Normal	N57E	88NE	84NW
Cuit-Fall-39	Cuitzillo el grande	280176	2188988	Zona de alteracion			
Cuit-Fall-40	Antes de puente a Huingo	309995	2201564	Falla derecha	E-W	76S	10W
Cuit-Fall-41	Acamabay			Falla Normal (Control)		Acambay	
Cuit-Fall-42	San Agustin del Maiz	274733	2202421	Iodo Geotermico SAM			
Cuit-Fall-43	Campo geotermico de Araró	308017	2201822	Deposito hidrotermal			

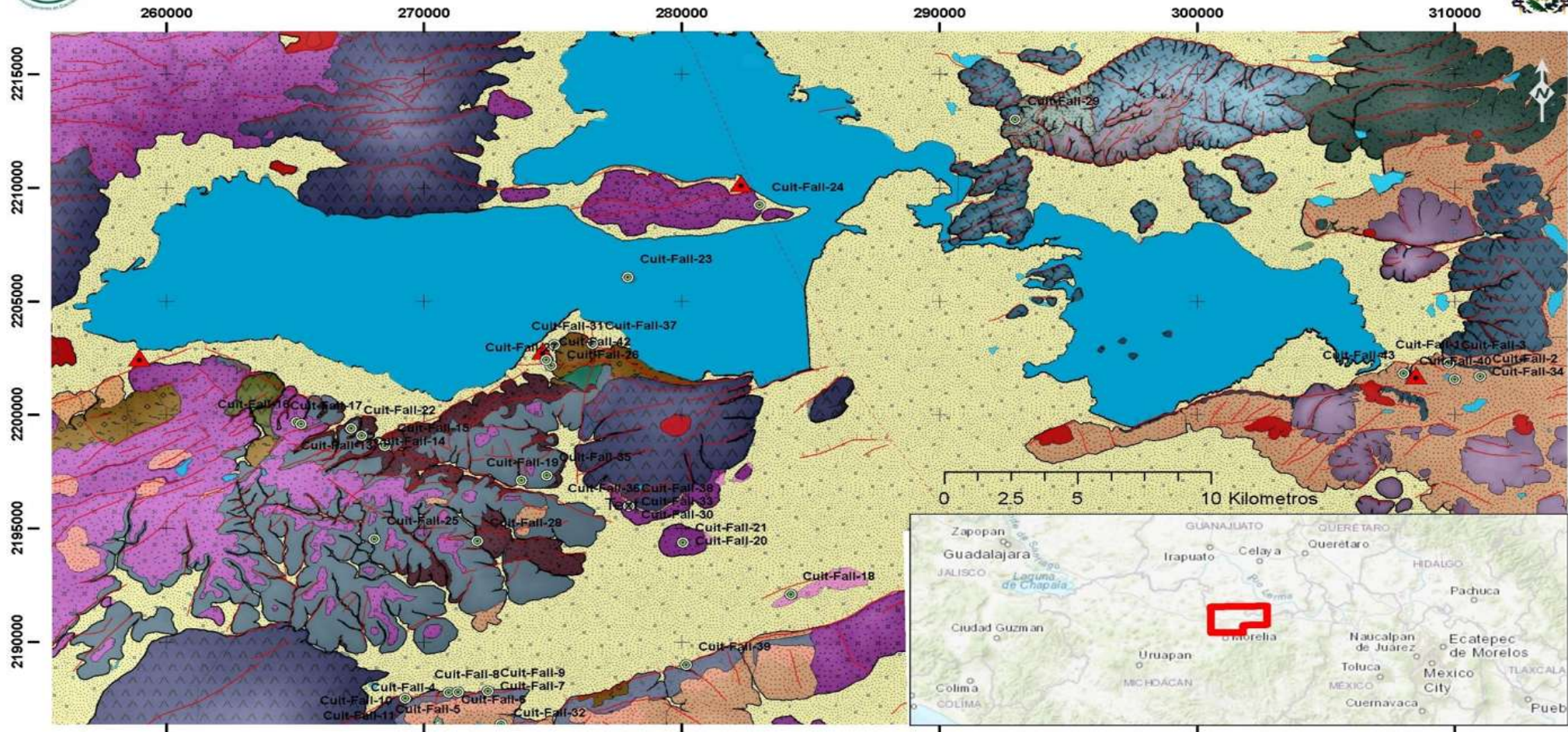
Tabla 1. Se muestran los datos de las etiquetas generadas en los diferentes puntos de muestreo, con su localización geográfica, localidades cercanas a la zona y datos estructurales de las mismas.

Clave	Difracción de Rayos X	Espectroscopia Infrarroja
Cuit-Fall-1	Cuarzo, Haloisita, Tridimita, Paligorskita, Sanidina	Cuarzo, Paligorskita
Cuit-Fall-2	Calcita, Andesina	Calcita, Montmorillonita
Cuit-Fall-3	Mordenita, Tridimita Cristobalita, Andesina, Sanidina	Opalo CT( Cristobalita-Tridimita)
Cuit-Fall-4	Calcita	Calcita, Montmorillonita
Cuit-Fall-5	Saponita, Calcita	Montmorillonita, Saponita
Cuit-Fall-6	Calcita	Calcita
Cuit-Fall-7	Saponita, Magnetita, Cristobalita, Labradorita, Sanidina	Saponita, Cristobalita
Cuit-Fall-8	Saponita, Anortita, Hydrobiotita, Paligorskita	Saponita
Cuit-Fall-9	Anortita, Haloisita, Sepiolita, Chabazita, Saponita, Celadonita	Saponita, Anortita, Halosita
Cuit-Fall-10	Calcita, Saponita	Calcita
Cuit-Fall-11	Calcita	Calcita, Montmorillonita
Cuit-Fall-12	Calcita	Calcita
Cuit-Fall-13	Calcita, Saponita, Montmorillonita, Clinoptilolita	Calcita
Cuit-Fall-14	Paligorskita, Cuarzo, Saponita	Saponita
Cuit-Fall-15	Calcita	Calcita
Cuit-Fall-16	Celadonita, Saponita	Celadonita, Saponita
Cuit-Fall-17	Celadonita, Saponita, Goethita, Halloisita	Celadonita
Cuit-Fall-18	Calcita, Moscobita, Albita	Calcita
Cuit-Fall-19	Montmorillonita, Palygorskita trydimita, Celadonita, Albita	Heulandita, Chabazita
Cuit-Fall-20	Calcita, Magnetita, Cristobalita, Montmorillonita, Albita, Trydimita	Biotita, Muscovita, Nephelina
Cuit-Fall-21	Calcita, Cristobalita	Calcita
Cuit-Fall-22	Trydimita, Montmorillonita, Cristobalita, Clinoptilolita	Montmorillonita, Leucita, Erionita
Cuit-Fall-23	Calcita, montmorillonita, Magnetita, Trydimita, Cristobalita	Phologopita, Biotita, Illita
Cuit-Fall-24	Calcita, Saponita	Phologopita, Saponita, Illita
Cuit-Fall-25	Calcita, Magnetita, Cristobalita Tridymita, Clinoptilolita	Heulandita, Chabazita, Montmorillonita
Cuit-Fall-26	Calcita	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-27	Calcita, Magnetita, Montmorillonita	Calcita
Cuit-Fall-28	Calcita	Calcita
Cuit-Fall-29	Laumontita, Cuarzo	Lizardita, Spessartita
Cuit-Fall-30	Paligorskita, Cuarzo, Mordenita, Trydimita, Sanidina, Albita	Natrolita, Antigonita
Cuit-Fall-31	Calcita, Cuarzo, Ankerita, Trydimita	Calcita, Travertino, Siderita
Cuit-Fall-32	Cuarzo	Clinoptilolita, Mordenita, Heulandita
Cuit-Fall-33	Calcita	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-34	Carlinita	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-35	Halloisita, Magnetita, Montmorillonita, Trydimita, Moscovita	Biotita, Clinoptilolita
Cuit-Fall-36	Palygorskita, Anorthita, Tridymita, Halloisita, Montmorillonita	Antigonita, Natrolita
Cuit-Fall-37	Calcita, Ankerita, Cuarzo	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-38	Palygorskita, Tridymita, Mordenita, Cuarzo, Cristobalita, Sanidina	Nephelina, Labradorita, Saponita, Montmorillonita
Cuit-Fall-39	Dolomita, Calcita	Calcita
Cuit-Fall-40	Albita, Sylvita, Montmorillonita	Staurolita, Labradorita, Saponita, Montmorillonita
Cuit-Fall-41	Calcita, Magnetita	Calcita
Cuit-Fall-42	Albita	Saponita, Nephelita, Labradorita
Cuit-Fall-43	Calcita, Heulandita, Cristobalita	Clinoptilolita, Mordenita, Montmorillonita, Heulandita

*Tabla 2. Se muestran los datos de las etiquetas generadas en los diferentes puntos de muestreo, con su localización geográfica, localidades cercanas a la zona y datos estructurales de las mismas.*



# Mapa Geológico-Estructural del Lago de Cuitzeo



**Legenda**

Muestra	Falla Tzitzio	Conos cineriticos	Vulcanismo Andesitico-Basaltico	Intrusivo Dioritico	Andesitas Tarimbaro
Campo Geotermico	Cuerpo de agua	Depositos de caída	Traquiandesitas	Ign. Jamaica	Andesitas Rio Chiquito
Falla	Aluvion	Andesitas Araró	Intrusivo Andesitico	Ign. Yerba buena	Andesitas Sierra San Andres
Fractura	Volcanoclasticos	Semiescudos	riolitas	Ign. Chucandiro	Andesita Mil Cumbres

Sistema de Coordenadas: WGS 1984  
 Proyección: Mercator Auxiliary Sphere  
 Datum: WGS 1984  
 Unidades: Metros  
 Elaboro Ing. Addí E. Maciel Rivera

Figura VII.18. Mapa geológico-estructural de la zona de estudio, en el cual se observa la localización de los puntos de muestreo generados durante la campaña de trabajo de campo.



### VII.III.I Análisis de la mineralogía por familia de fallas y regiones

Para el análisis de los resultados obtenidos se han clasificado las muestras a partir del tipo de falla en que estas se recolectaron, con la finalidad de observar la mineralogía presente en las estructuras que han sido generadas por diferentes campos de esfuerzos durante la evolución cinemática de la zona; así como la región a la que pertenece cada muestra, dependiendo la cercanía que estas presenten con las estructuras principales en el área de estudio. Para un mejor análisis de estos resultados se realizaron seis tablas que se presentaran a continuación y en las que se observa la relación de las estructuras con la mineralogía secundaria presente en cada región y tipo específico de estructura geológica.

#### 1.- Fallas Normales

Como se aprecia en la tabla 3 en la Región Suroeste los minerales neoformados depositados en el plano de las fallas normales (Fig. VII.19) son principalmente cuarzos amorfos y arcillas. Para la Región Oeste además de los cuarzos amorfos y los minerales arcillosos comienzan a aparecer carbonatos. En la región Este los minerales identificados son calcita y Cuarzo amorfo (Fig. VII.19).



*Figura VII. 19. Imágenes de los puntos de muestreo Cuit-Fall-3 (derecha) y Cuit-Fall-7 (izquierda).*

Fallas normales			
Clave	Región	Rumbo	Mineralogía
Cuit-Fall-7	Suroeste	N-S	Saponita, Cristobalita
Cuit-Fall-35	Suroeste	E-W	Halloysita, Tridymita
Cuit-Fall-13	Oeste	N-S	Calcita
Cuit-Fall-15	Oeste	E-W	Calcita
Cuit-Fall-19	Oeste	E-W	Montmorillonita, Palygoskita
Cuit-Fall-30	Oeste	N-S	Palygoskita, Cuarzo
Cuit-Fall-33	Oeste	N-S	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-38	Oeste	E-W	Palygoskita, Tridymita
Cuit-Fall-2	Este	E-W	Calcita
Cuit-Fall-3	Este	E-W	Ópalo CT
Cuit-Fall-34	Este	E-W	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-41	Acambay	E-W	Calcita

Tabla 3. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo normal.

## 2.-Fallas laterales derechas

Se observa en la tabla 4 que en la Región suroeste los minerales neoformados en las fallas laterales derechas (Fig. VII.20), son principalmente minerales arcillosos independientemente del rumbo que presente la estructura, en la Región Oeste la calcita sigue con una fuerte presencia y por último para la región Este se observa como dominante en estas fallas los minerales arcillosos.



Figura VII. 20. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall- 40 (izquierda) y Cuit-Fall-9 (derecha).

Fallas laterales derechas			
Clave	Región	Rumbo	Mineralogía
<b>Cuit-Fall-8</b>	Suroeste	N-S	Saponita
<b>Cuit-Fall-9</b>	Suroeste	E-W	Saponita, Anortita
<b>Cuit-Fall-21</b>	Oeste	N-S	Calcita
<b>Cuit-Fall-40</b>	Este	E-W	Montmorillonita

*Tabla 4. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo lateral derecho.*

### 3.- Fallas laterales izquierdas

Para las estructuras de falla con un desplazamiento de tipo lateral izquierdo podemos observar en la tabla 5 un dominio de los minerales carbonatados en la Región Suroeste independientemente del rumbo de las estructuras. Para la Región Oeste las fallas con rumbos E-W presentan minerales neoformados arcillosos y la estructura N-S Calcita y cuarzo amorfo. Por ultimo para la Región Centro se observa calcita y cuarzo en este tipo de fallas (Fig. VII.21).



*Figura VII. 21. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-14 (izquierda) y Cuit-Fall-22 (derecha).*

<b>Fallas laterales izquierdas</b>			
<b>Clave</b>	<b>Región</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Mineralogía</b>
<b>Cuit-Fall-4</b>	Suroeste	N-S	Calcita
<b>Cuit-Fall-5</b>	Suroeste	E-W	Calcita, Saponita
<b>Cuit-Fall-14</b>	Oeste	E-W	Saponita
<b>Cuit-Fall-22</b>	Oeste	E-W	Montmorillonita
<b>Cuit-Fall-25</b>	Oeste	N-S	Calcita, Opalo CT
<b>Cuit-Fall-31</b>	Centro	E-W	Calcita, Cuarzo

*Tabla 5. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de falla con un desplazamiento de tipo lateral izquierdo.*

#### 4.- Fracturas

Con la finalidad de enriquecer y comparar los datos del muestreo de estructuras se levantaron puntos de muestreo en diversas fracturas rellenas con minerales neoformados a lo largo de las diferentes regiones en la zona de estudio (Fig. VII. 22). Para la Región Suroeste se observa una gran abundancia de calcita en las estructuras N-S y E-W, sin embargo para fracturas NW-SE las zeolitas son los principales minerales de relleno. En la Región Oeste la calcita y las arcillas se presentan como mineral de relleno en las estructuras con rumbos E-W. En la región centro se observa un gran dominio de la calcita y el cuarzo amorfo. Por último en la Región Este la calcita y los minerales arcillosos son los que rellenan las estructuras de fractura (Tab. 6).





Figura VII. 22. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-10 (izquierda) y Cuit-Fall-1 (derecha).

Fracturas			
Clave	Región	Rumbo	Mineralogía
Cuit-Fall-6	Suroeste	N-S	Calcita
Cuit-Fall-10	Suroeste	N-S	Calcita
Cuit-Fall-12	Suroeste	E-W	Calcita
Cuit-Fall-32	Suroeste	NW-SE	Clinoptinolita
Cuit-Fall-20	Oeste	E-W	Calcita, montmorillonita
Cuit-Fall-28	Oeste	E-W	Calcita
Cuit-Fall-36	Oeste	E-W	Montmorillonita, palygoskita
Cuit-Fall-26	Centro	NE-SW	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-37	Centro	E-W	Calcita, Travertino
Cuit-Fall-1	Este	E-W	Calcita, palygoskita

Tabla 6. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en planos de fracturas rellenas con minerales neoformados.

## 5.- Zonas de alteración

Durante el trabajo en campo se identificaron diversas zonas con una alta alteración hidrotermal a pesar de que la mayoría de estas se encuentran alejadas de los campos geotérmicos activos actualmente, razón por la cual deriva su importancia como fuentes de información sobre la existencia de paleocampos geotérmicos en las diferentes regiones (Tab. 7). En la Región Suroeste se observan dos zonas de alteración en las cuales el mineral neoforado es calcita, al igual que en la Región Centro, aunque cabe mencionar que en la muestra Cuit-Fall-23 se tiene presencia de Ópalo CT. Para la Región Noreste se observa una mineralogía de calcita y minerales arcillosos en una muestra y en la otra cuarzo amorfo (Fig. VII.23).



Figura VII. 23. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-11 (izquierda) y Cuit-Fall-23 (derecha).

Zonas de alteración			
Clave	Región	Rumbo	Mineralogía
<b>Cuit-Fall-11</b>	Suroeste	N-S	Calcita
<b>Cuit-Fall-39</b>	Suroeste	Inapreciable	Calcita
<b>Cuit-Fall-23</b>	Centro	E-W	Calcita, Ópalo CT

<b>Cuit-Fall-27</b>	Centro	Inapreciable	Calcita
<b>Cuit-Fall-24</b>	Noreste	Inapreciable	Calcita, Saponita
<b>Cuit-Fall-29</b>	Noreste	Inapreciable	Cuarzo

*Tabla 7. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas en zonas con presencia de alta alteración hidrotermal.*

#### 6.- Depósitos de manifestaciones recientes

En la zona de estudio se localizaron depósitos de fractura y manifestaciones termales inactivas con rellenos de minerales neoformados (Fig. VII.24), que por su cercanía a sistemas termales activos se consideraron como parte de la evolución de dichos sistemas (Tab. 8). En la Región Centro al sur del Campo Geotérmico de San Agustín del Maíz se identificó saponita y albita en la muestra recolectada, en cambio en la Región Este, al Sur del Campo geotérmico de Araró se identificó calcita y cuarzo amorfo en los minerales de relleno.



*Figura VII. 24. Fotografías de los puntos de muestreo Cuit-Fall-43 (izquierda) y Cuit-Fall-42 (derecha).*

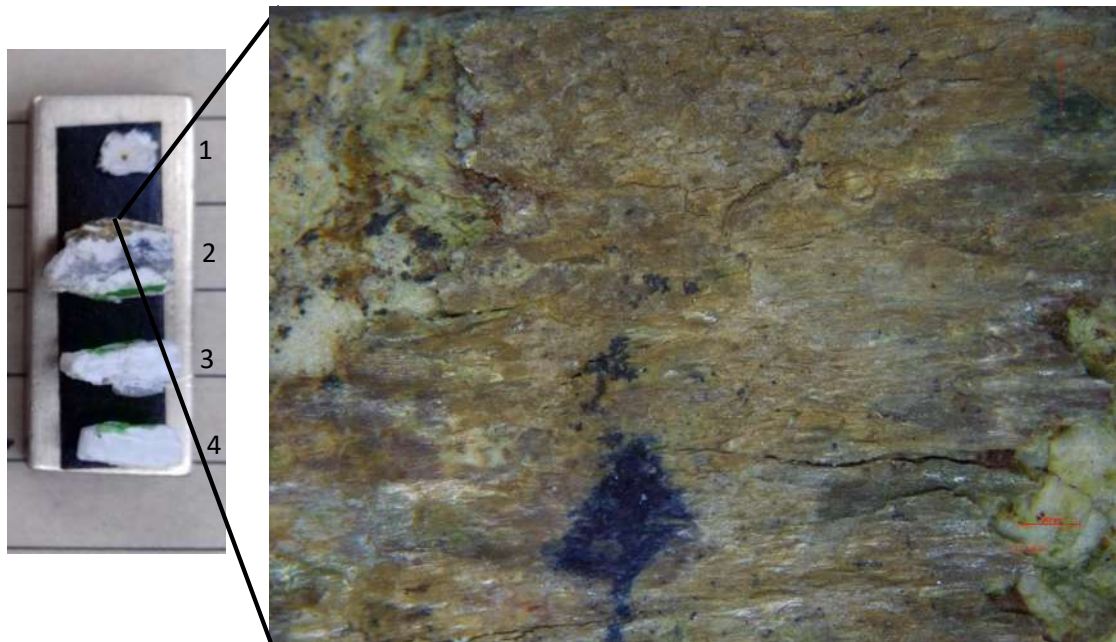
<b>Depósitos Recientes</b>			
<b>Clave</b>	<b>Región</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Mineralogía</b>
<b>Cuit-Fall-42</b>	Centro	Inapreciable	Saponita, Albita
<b>Cuit-Fall-43</b>	Este	Inapreciable	Calcita, Cuarzo

*Tabla 8. Se muestra en la tabla los resultados de las especies minerales presentes en las muestras recolectadas los denominados depósitos recientes.*



### VII.III.II. Microscopia Electrónica de barrido

Con la finalidad de observar las características morfológicas de los cristales en muestras que presentan indicadores cinemático reflejados sobre su superficie (Fig. VII.25) se realizó la preparación de cuatro muestras para ser vistas a través del microscopio electrónico de barrido y obtener así un panorama a escala nanométrica de los cristales que conforman la muestra y determinar si el crecimiento de mismos se ve influenciado por el campo de esfuerzos al que estos se ven sometidos durante su formación. En este análisis se usaron tres muestras de fallas geológicas, las cuales corresponden a las etiquetas Cuit-Fall-3, 22, y 21, de la misma manera se tomó una muestra de una zona de alteración con la etiqueta Cuit-Fall-23, que no se encontrara sometida a esfuerzos deformacionales y así comparar los resultados.



*Figura VII.25. En la izquierda se observa una imagen de las muestras sometidas al microscopio electrónico de barrido, la muestra 1 corresponde al punto Cuit-Fall-3, la 2 a Cuit-Fall-22, la 3 a Cuit-Fall-21, la 4 a Cuit-Fall-23. En la imagen de la derecha se observa una imagen de la superficie de la muestra 2, obtenida con una lupa petrográfica y en la cual se logran apreciar las estrías presentes en la muestra.*

### 1.- Muestra Cuit-Fall-3

Esta muestra pertenece a la Región Este del área de estudio, siendo recolectada en el sector Este de la falla Araró-Zimirao, dentro del límite Sur del Graben de Araró. Mineralógicamente se ha determinado la especie mineral de esta muestra como un ópalo tipo CT (Cristobalita-Trydimita), en muestra de mano se presentaban indicadores cinemáticos a manera de escalonamientos, que indicaban un desplazamiento normal del bloque de piso que conforma la falla.

En el análisis con el MEB se observó la muestra en tres escalas, siendo la primera a X270 (Fig. VII.26 A) y en la cual se observan cavidades en las que el ópalo presenta un crecimiento típico del mineral al no encontrarse confinado, sin embargo en las orillas de estas cavidades se observan estructuras que responden a capas fragmentadas que asemejan los escalones apreciados a simple vista. A una escala de X1,000 (Fig. VII.26 B) se reconocen de mejor manera estos escalonamientos en dos partes los más grandes respondiendo al movimiento normal de la falla y los pequeños a un movimiento lateral izquierdo. A una escala de X10,000 (Fig. VII.26 C) se observan estrías en las que incluso comienzan a crecer los pequeños ópalos aprovechando estas hendiduras.

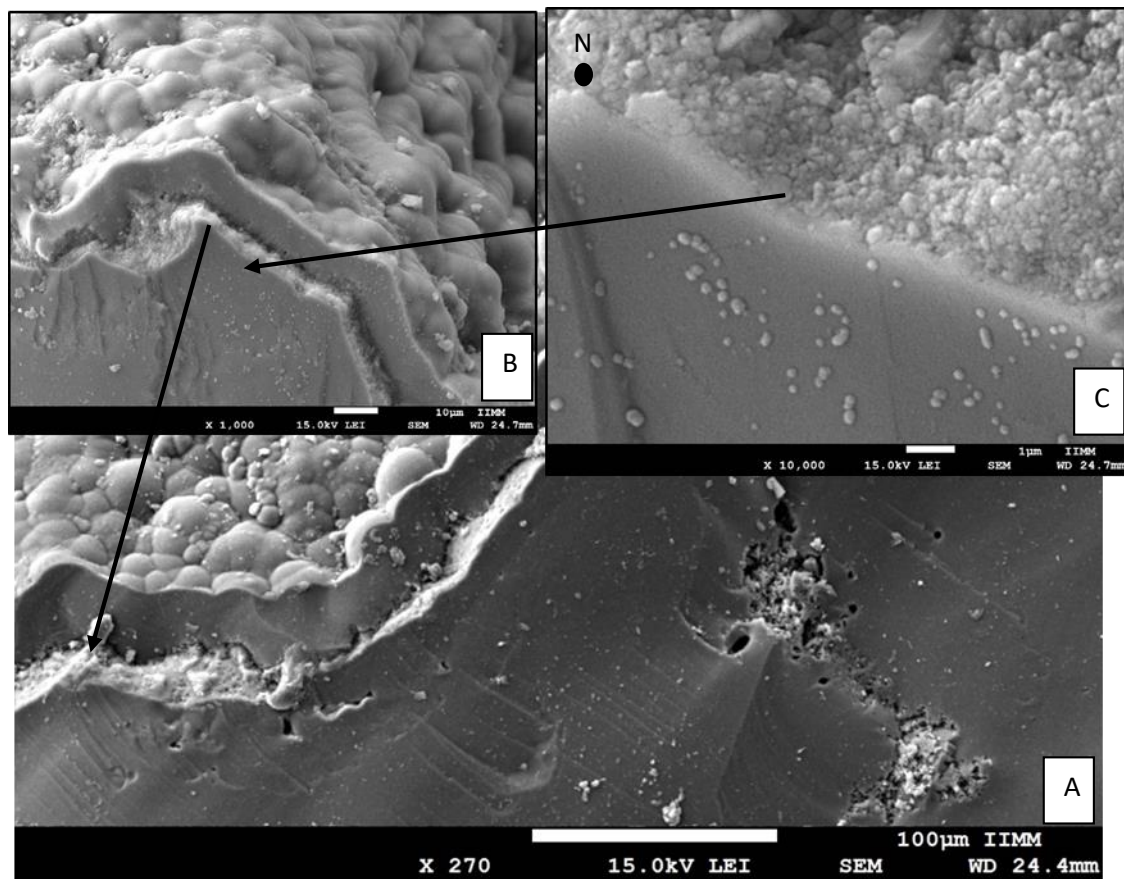


Figura VII.26. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X270, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X10,000 en la muestra Cuit-Fall-3.

## 2.- Muestra Cuit-fall-22

Esta muestra pertenece a la Región Oeste del área de estudio, siendo recolectada en las cercanías a la Falla la Yerbabuena, sobre la autopista Cuitzeo-Pátzcuaro. Mineralógicamente se ha determinado esta muestra como principalmente Montmorillonita y Trydimita. En muestra de mano se precian de manera clara indicadores cinemáticos de tipo estrías que evidencian el movimiento lateral izquierdo de la estructura en que se recolectó.

El análisis con el MEB se realizó de la misma manera que el anterior en tres escalas principales. En una escala de X500 se logran apreciar la forma de crecimiento de los minerales y se perciben las estrías impresas en el material de relleno que conforma la muestra (Fig. VII.27 A). En la escala de X1,000 se aprecia un acercamiento a la zona de crecimiento de los minerales y se observa que los planos más alargados de los minerales se encuentran alineados con

una dirección similar a la de las estrías observadas en la anterior escala (Fig. VII.27 B). A una escala de X5,000 se nota que en las cavidades dejadas por algunas fracturas o escalones, el crecimiento del mineral tiende a ser más hacia el frente de la imagen que es el Sur de la muestra (Fig. VII.27 C).

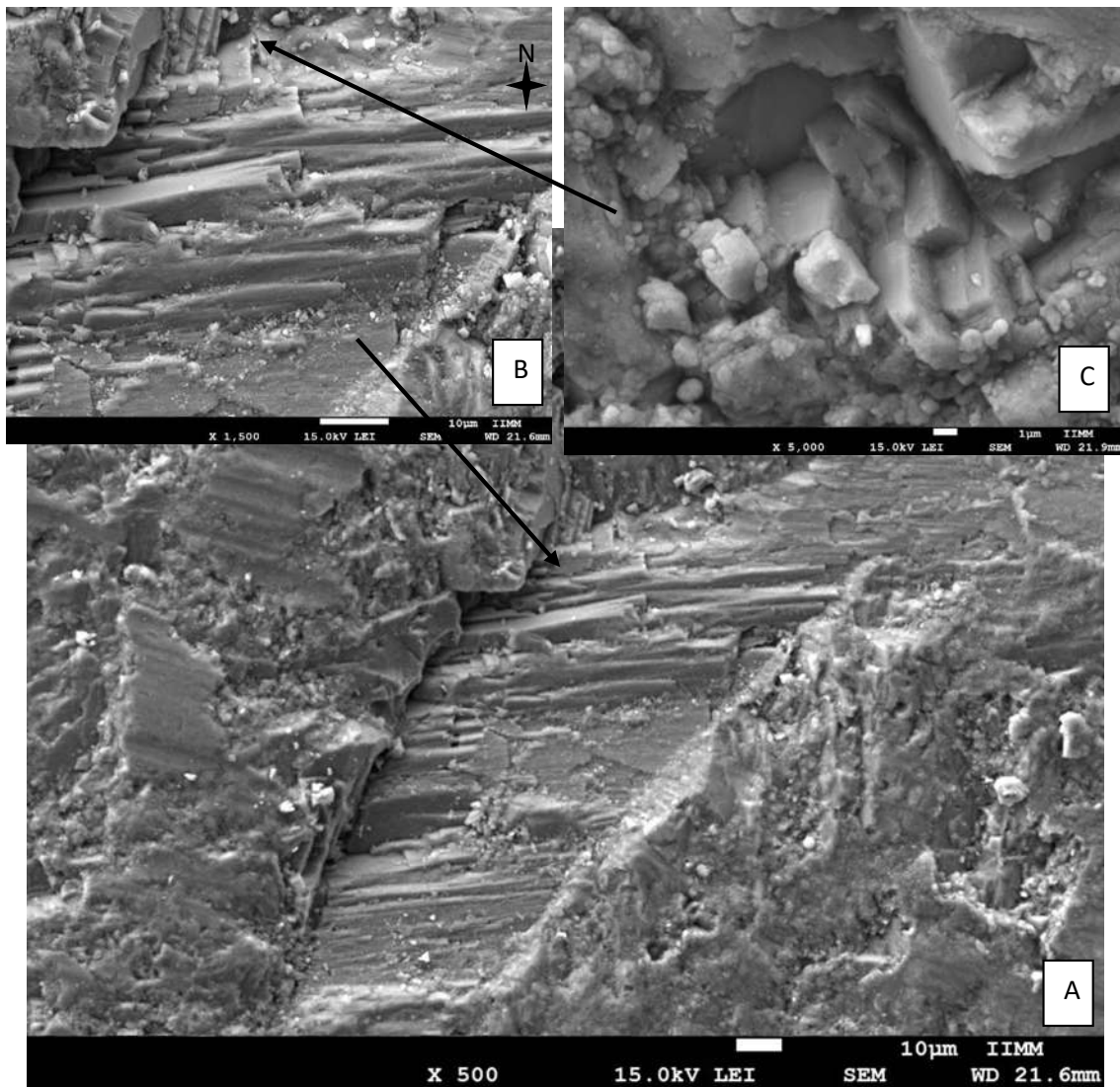


Figura VII.27. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X500, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-22.



### 3.- Muestra Cuit-Fall- 21

Esta muestra se recolectó en la comunidad de Plan de Ayala, en un banco de material en el que explotan las Ignimbrita de la zona y por su cercanía al límite sur de la Falla la Yerbabuena se le considera perteneciente a la Región Oeste. Mineralógicamente la muestra se ha determinado como una Calcita, con impurezas de cristobalita. En el afloramiento en que se recolectó y sobre la misma muestra se encontraron indicadores cinemáticos de tipo estrías, que evidenciaron la presencia de una falla lateral derecha en la cual se alojaba la muestra.

En la escala de observación de X250 (Fig. VII.28 A) se ve en la zona central de la imagen el crecimiento de los minerales de calcita, cabe resaltar que lo que pueden parecer estrías en la periferia de la imagen en realidad son el resultado de la abrasión del disco de corte con el que fue limpiada y cortada la muestra antes del análisis. Con una escala de X1,000 (Fig. VII.28 B) se observa que el crecimiento de estos minerales no parece seguir un patrón específico como en el caso de las muestras anteriores, lo cual se ve mejor reflejado al acercarnos en la escala X5,000 (Fig. VII.28 C), donde sólo se observa una morfología típica del crecimiento de las calcitas.

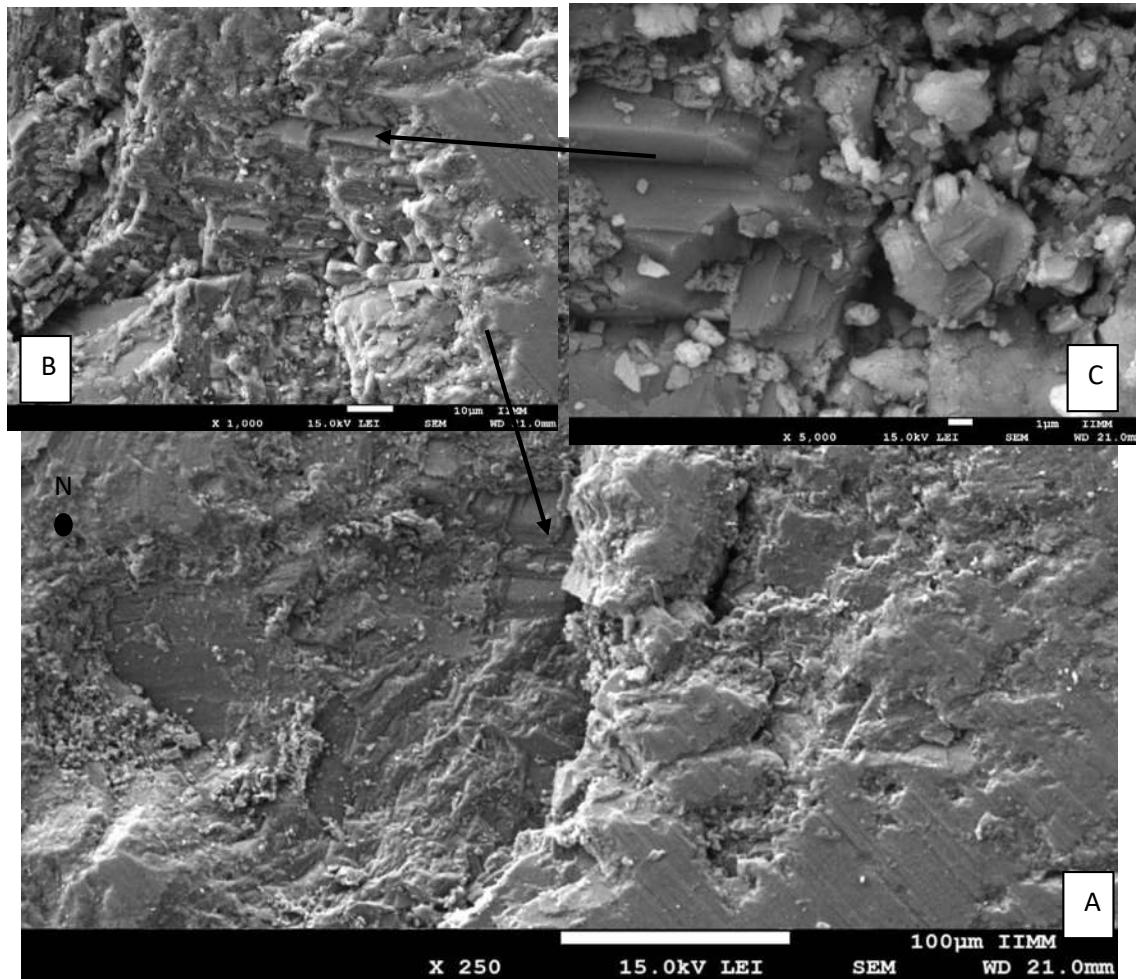


Figura VII.28. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X250, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-21.

#### 4. – Muestra Cuit-Fall-23

Esta muestra pertenece a la Región Centro, fue recolectada en la isla conocida como Isla de las Serpientes, localizada al Este de la carretera federal número 43. Mineralógicamente la muestra se ha determinado como una calcita con presencia de minerales arcillosos. En el área del afloramiento se observó una tendencia de la zona de alteración con un rumbo E-W, sin embargo al no observar fracturas ni fallas visibles se consideró la muestra como un buen punto de referencia para comprar con las otras tres muestras que pertenecen a estructuras de fallas.

En las imágenes generadas por el MBE se puede observar en la escala X250 (Fig. VII.29 A), que no existe un arreglo específico del crecimiento de los minerales en la muestra. En la imagen a una escala de X1000(Fig. VII.29 B), se observa que en las cavidades de la muestra los minerales forman estructuras tipo geodas al crecer libremente y con una escala mayor como en la imagen a escala X5000, la forma de crecimiento en hojas de las calcitas se ve claramente (Fig. VII.29 C).

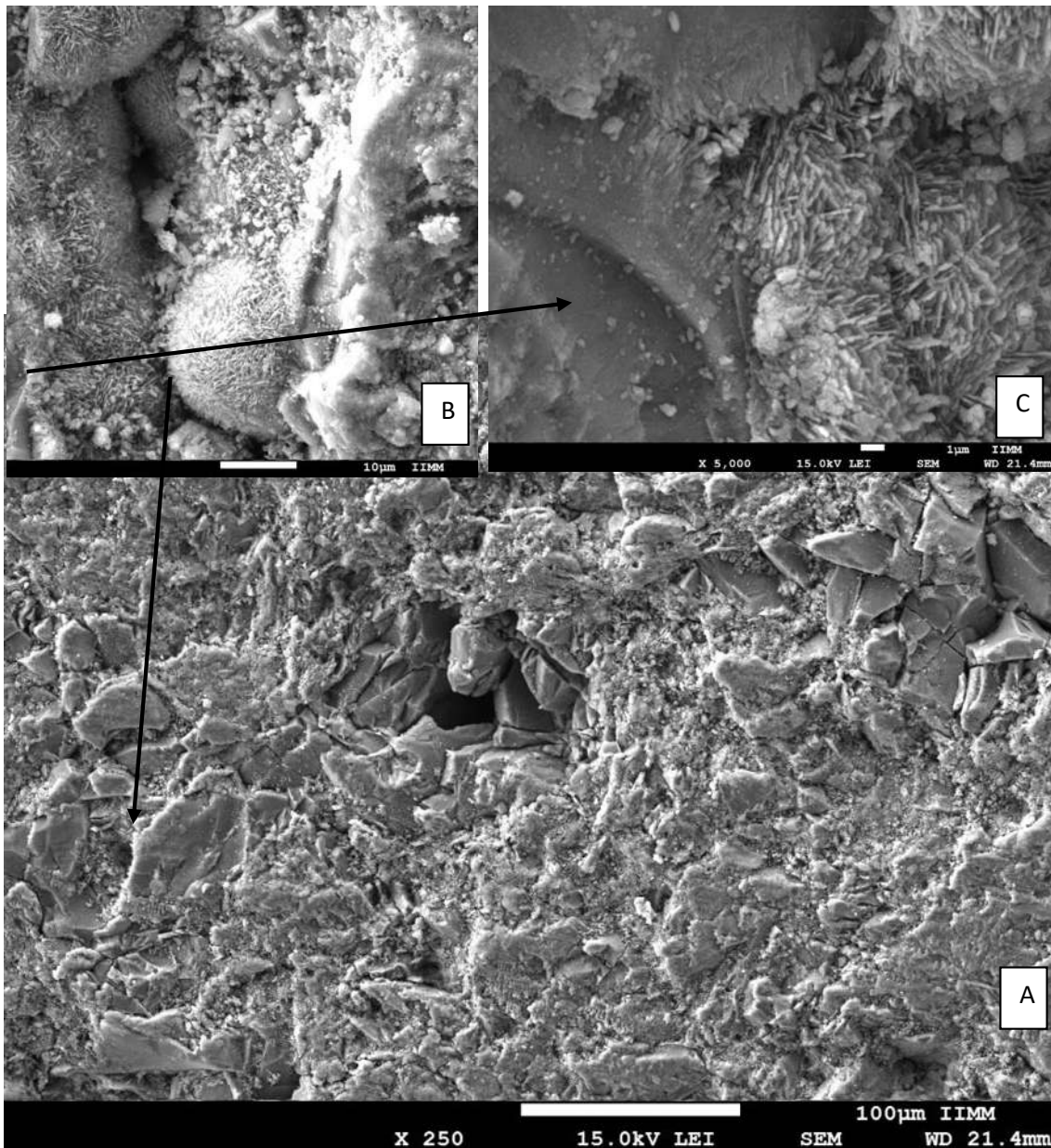


Figura VII.29. A) Imagen generada por el MEB a una escala de X250, B) imagen a una escala de X1,000, y C) Imagen a una escala de X5,000 en la muestra Cuit-Fall-23.

### **VII.III.III. Microtomografía**

La Microtomografía al ser un método no destructivo garantiza la integridad de los minerales presentes en la muestra y por lo tanto se puede observar la distribución de los mismos a través de plano de falla, fractura o depósito que se esté analizando en cada caso.

A continuación se presentan los resultados de tres muestras a las que se les realizó un análisis de Microtomografía, para ver la estructura interna y la distribución mineral presente en cada muestra. Los resultados de este estudio se presentan mediante una reconstrucción en tres dimensiones de imágenes obtenidas a partir del análisis de rayos X en las muestras. Se representan las diversas mineralogías en colores que representan la respuesta de ese mineral ante la radiación generada durante el análisis.

#### **1.- Muestra Cuit-Fall-18**

Muestra Perteneciente a la Región Suroeste de la zona de estudio. Esta muestra se recolectó de una fractura con dirección preferencial E-W, que presenta una evidencia de dos secuencias de mineralización, esto por el cambio en las características texturales de las zonas externas de la muestra, hacia el interior de la misma (Fig. VII.30), no se encontraron en esta zona indicadores cinemáticos.



*Figura VII.30. Corte lateral de la muestra Cuit-Fall-18, en el cual se aprecia el cambio de la coloración y de textura en el mineral de las partes más externas hacia la parte interna; la flecha indica la dirección de la cima de la muestra.*

Los resultados mineralógicos de la muestra indican que la muestra está compuesta mayoritariamente de calcita. En la reconstrucción 3D de la muestra se observa de una manera clara la presencia de dos especies minerales, la mayoritaria que conforma la matriz de la muestra (representada de color rojo en la reconstrucción 3D) (Figura VII.31. B) y la segunda no se ha identificado, sin embargo cabe destacar que este mineral, que se representa en la reconstrucción de color azul oscuro, además de encontrarse en la zona central del relleno de falla en la vista superior de la muestra se observa una estructura de relevo formada por este mineral (Figura VII.31. C4), manteniéndose de manera vertical en los cortes laterales de la muestra.

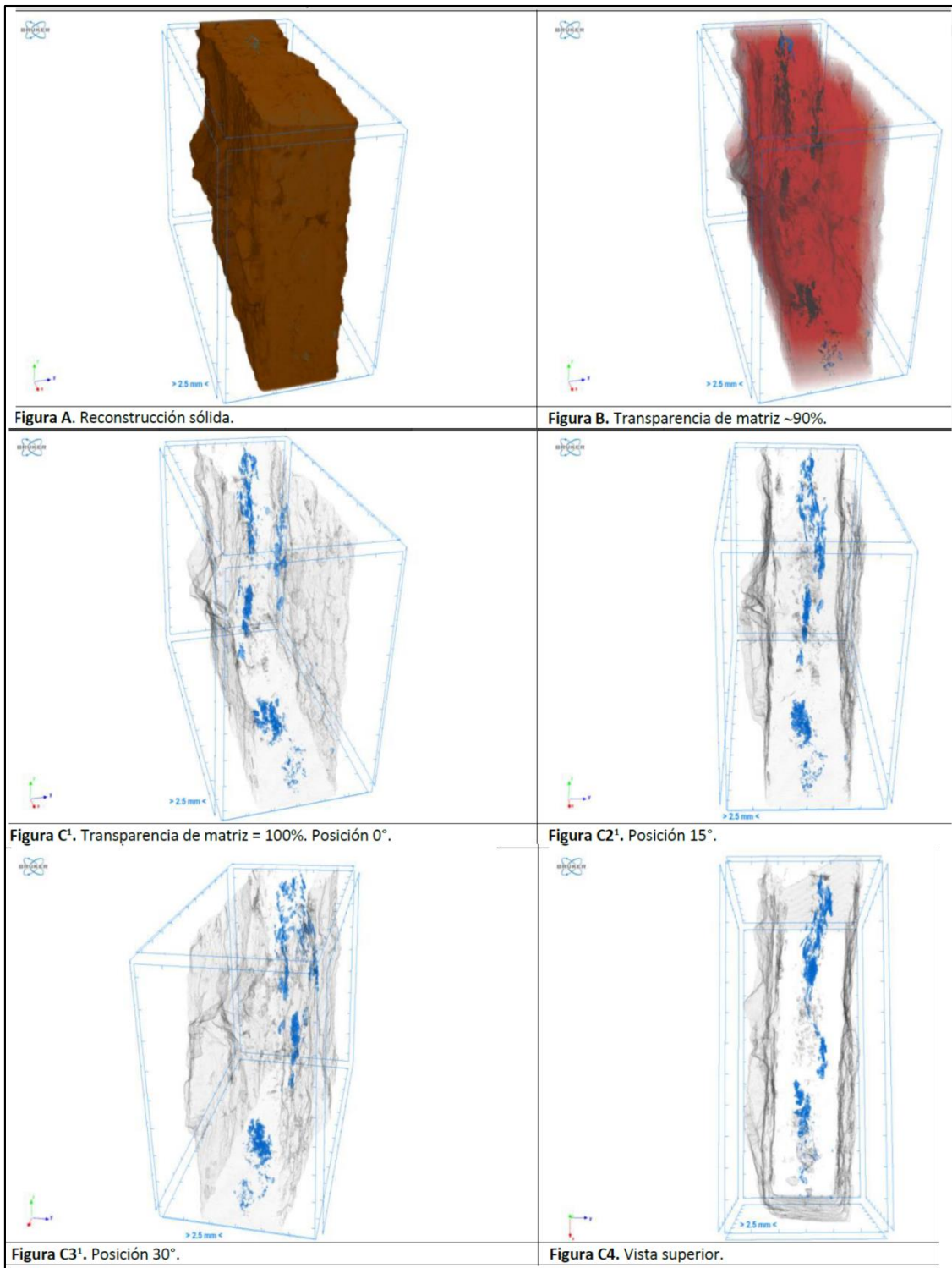


Figura VII.31. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-18.



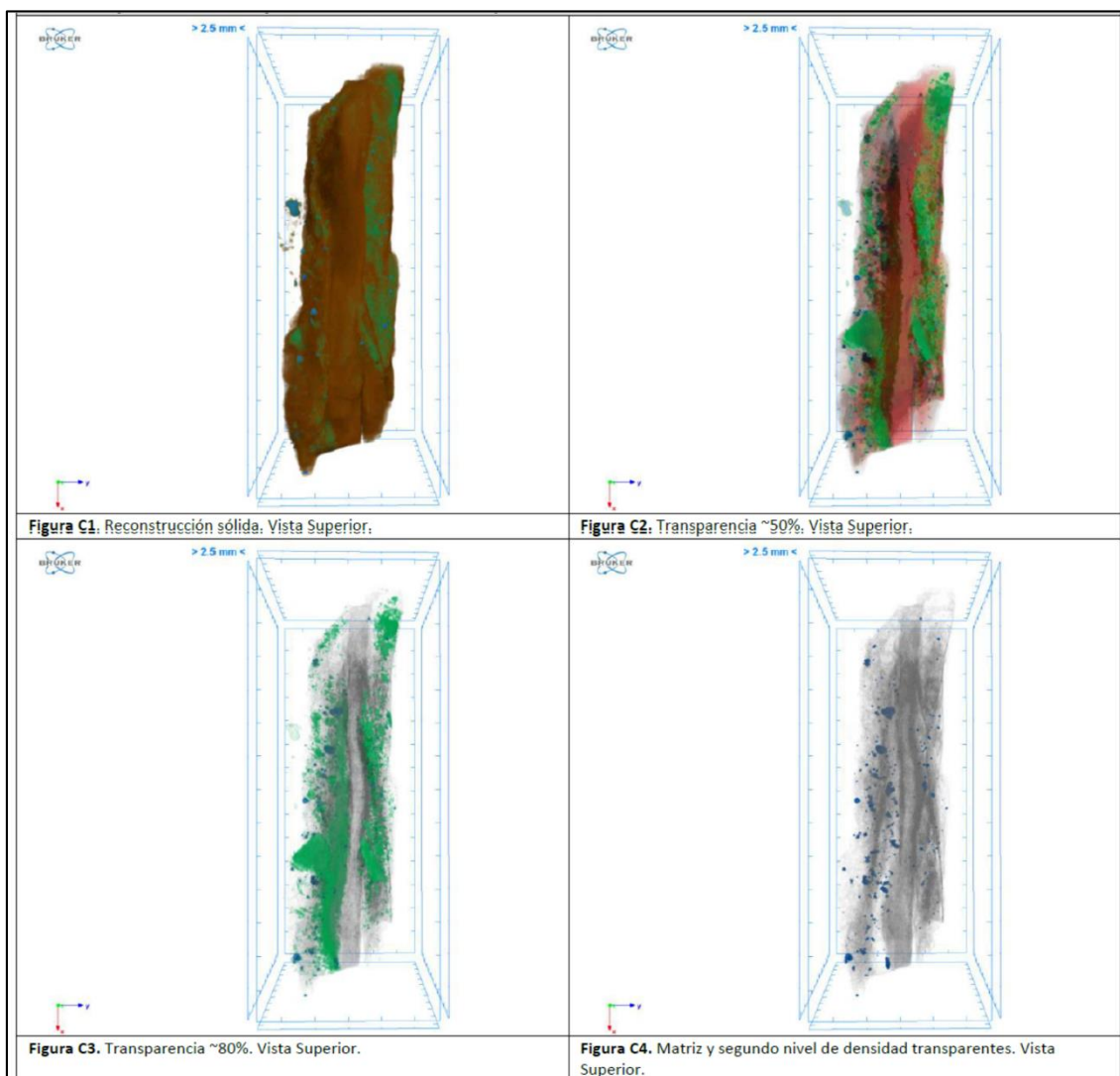
## 2.- Muestra Cuit-Fall-30

Muestra Pertenece a la Región Oeste de la zona de estudio, en la parte Sur de la Falla la Yerbabuena. Esta muestra se recolectó de una falla con desplazamiento de tipo normal y dirección preferencial N-S, que presenta una evidencia de tres secuencias de mineralización, evidenciadas por el cambio de textura, color y propiedades ópticas de la muestra. Mediante el análisis mineralógico de la muestra se determinó la gran abundancia de cuarzo amorfo y minerales arcillosos en la muestra. Es de notarse que en el corte lateral de muestra se aprecia una secuencia de tres depósitos, siendo el primero y más antiguo el de las zonas de la periferia de la muestra y el último, y que pudo sellar la permeabilidad en la muestra, localizado en la zona media (Fig. VII.32).



*Figura VII.32. Se muestra en la imagen un corte lateral de la muestra Cuit-Fall-30, en el que se evidencian las tres fases de depósitos minerales por los que paso la estructura hasta ser aparentemente sellada por estos minerales neoformados. La flecha indica la cima de la muestra, al momento de ser recolectada en campo.*

En la reconstrucción en 3D de la muestra indica cuatro niveles con diferentes densidades por lo tanto habría por lo menos esta misma cantidad de especies minerales que conforman la muestra. A continuación se presentan las imágenes de la vista superior de la muestra, ya que es en esta vista donde se logra apreciar de mejor manera la distribución de los minerales al interior de la muestra. Se observa que la muestra en su parte central alberga la mayor cantidad del mineral representado de color rosa el cual por sus características está asociado a Trydimita (Fig. VII.33 C2) las otras dos especies minerales presentes en la muestra se alojan a los alrededores de la primera, y por sus características físicas, estos minerales son los minerales arcillosos detectados en la muestra (Fig. VII.33 C1 y C3).

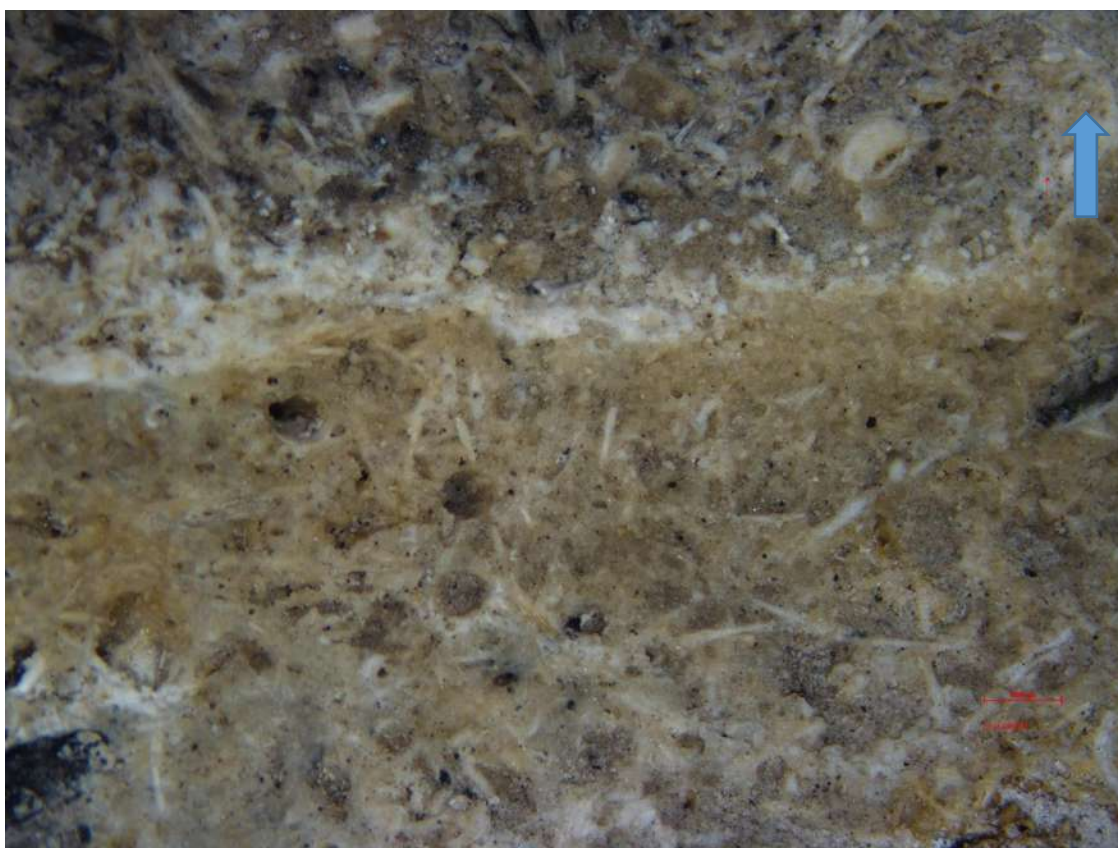


*Figura VII.33. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-30.*



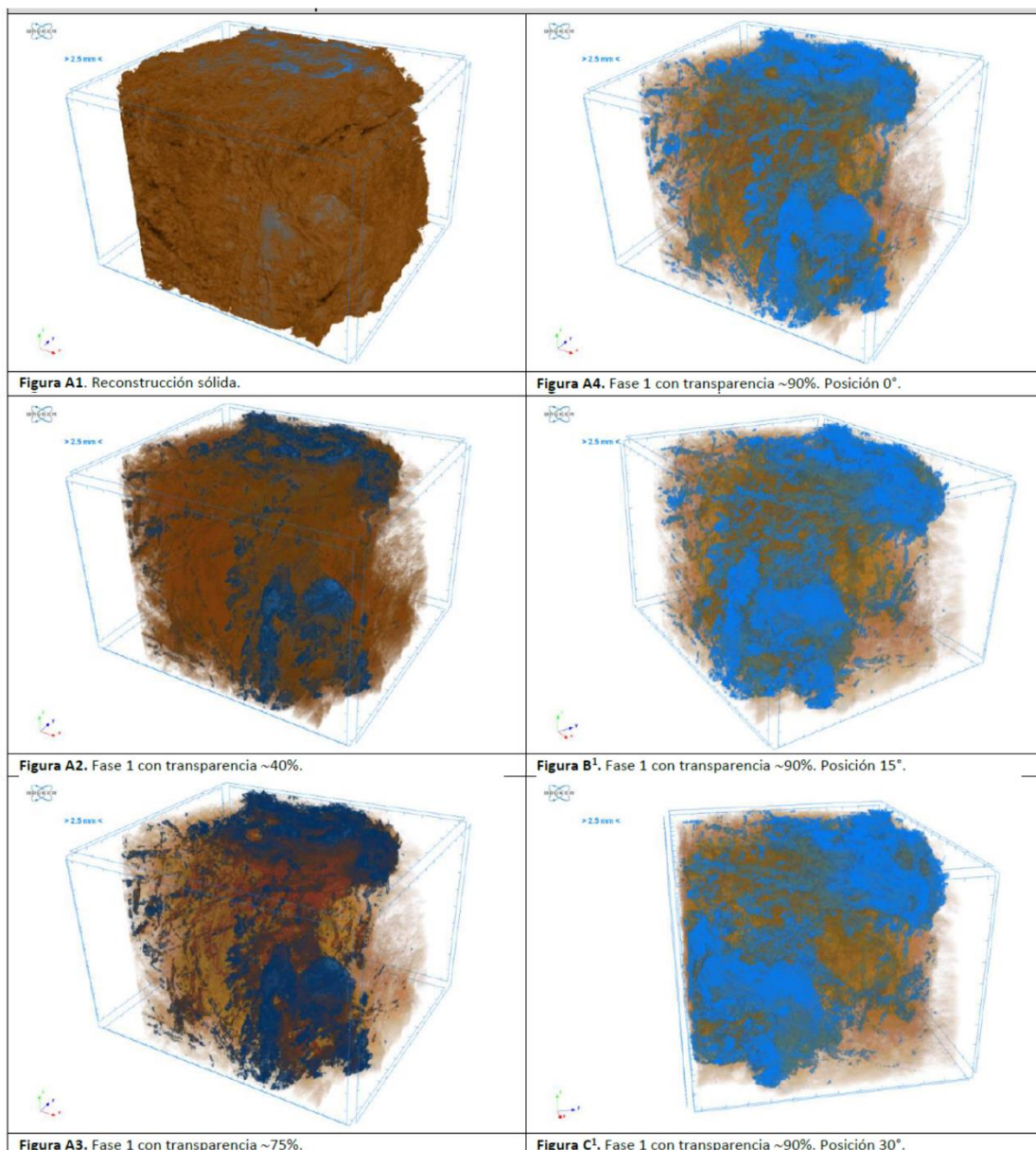
### 3.- Muestra Cuit-Fall-43

Muestra perteneciente a la Región Este de la zona de estudio, en las zonas cercanas a las manifestaciones geotérmicas de Araró. La muestra se recolectó de un depósito geotérmico sin actividad reciente apreciable y caracterizada por cubrir una amplia zona de hasta 12 metros de diámetro y con una altura no superior a los 30cm, con forma de terraza. Las especies minerales encontradas en la muestra corresponden a Calcita, Cristobalita y minerales arcillosos. La muestra de mano evidencia una forma de depósito caótico (Fig. VII.34), que genera una gran cantidad de poros en la muestra y da la apariencia de una textura deleznable a pesar de que ésta se encuentra bien consolidada.



*Figura VII.34. Imagen del corte lateral del depósito de minerales hidrotermales perteneciente a la muestra Cuit-Fall-43, se observa la forma de depósito caótico en comparación con las muestras de fallas y fracturas. La flecha indica la cima de la muestra al ser recolectada en campo.*

La reconstrucción 3D de la muestra evidencia cuatro zonas con diferentes densidades, por lo tanto se considera como mínimo la presencia esa misma cantidad de especies minerales conformando la muestra. Es notable la diferencia estructura interna de esta muestra con respecto a las anteriores debido a que los minerales no presentan un orden o acomodo en la muestra, más bien se observa una gran mezcla entre sus componentes (Fig. VII.35). El componente mayoritario de la muestra es el mineral representado en color café, el cual observándolo de manera conjunta y por sus características físicas, se determina que son los carbonatos presentes en la muestra.



*Figura VII.35. Imágenes de la reconstrucción 3d de la muestra Cuit-Fall-43.*

## Capítulo VIII. Discusión

Las características texturales de los planos de fallas o fracturas en diferentes estudios (Tripp *et al*, 2004, 2003, Sausse *et al*, 2016, Forero-Herrera, 2012, Cocabas *et al*, 2016, etc.), indican que la creación de espacios permeables durante la actividad de la falla es temporal, pues estos son rápidamente ocupados por la precipitación de minerales hidrotermales. Los minerales al rellenar las estructuras funcionarán como una molde de las mismas y registrará la evolución en los movimientos que se generen durante la actividad del campo esfuerzos que afecte a ésta.

La presencia de minerales neoformados tiene un significado específico, por ejemplo algunos como las Zeolitas y Caolinitas indican una baja temperatura de formación, mientras que minerales como la Calcita, Epidota, Pirita, Actinolita y Adularia, solo recristalizan en condiciones de ebullición (Ruggieri *et al*, 2006). Como se observó en los resultados en las diferentes regiones aledañas al Lago de Cuitzeo se tiene una importante presencia de minerales carbonatados en específico la calcita que se ha encontrado como mineral de relleno en 25 de las 43 muestras analizadas durante este estudio, que nos indica que la zona se ha visto altamente influenciada por fluidos termales a una temperatura igual o superior a los 100°C., aunado a esto la presencia en la zona de minerales pertenecientes a los polimorfos del SiO<sub>2</sub> ( Trydimita, Ópalo C, Ópalo CT) indica que las temperaturas de los fluidos debieron ser superiores en estas zonas a los 120°C, como se ha encontrado en estudios anteriores (Olvera-García, 2017).

La intersección de sistemas de fallas diferentes como el sistema de fallas laterales izquierdas de dirección NE, E-W y ENE, un sistema de fallas normales reactivado en los planos del sistema anterior (evidenciado en la sobreimpresión de estrías) y un sistema de fallas laterales derechas de direcciones NNO y N-S (Olvera-García, 2017) ha jugado un papel importante en el ascenso y distribución de los fluidos hidrotermales, es por esto que justamente en áreas de intersección de fallas es donde se encontraron planos de fallas y fracturas con presencia de minerales neoformados en la zona de estudio. Lo que demuestra un control de la mineralización por parte de estas estructuras y se puede reconocer a la falla

o fractura como un ordenador para tener control sobre la localización del mineral (Tripp *et al*, 2003).

En estudios anteriores se ha considerado a la presencia de Ópalo CT y travertinos como un indicador para estimar que tan activas son las fallas o los depósitos de sínter ya que en estos depósitos el sínter original es de tipo Ópalo-A, el cual evoluciona a Ópalo C y CT y eventualmente a cuarzo, esta aparición del cuarzo solo se da en depósitos mayores a 10 mil años (Herdianita *et al*, 2000). En estructuras E-W (muestras Cuit-fall- 3, 23, 26, 34, 37) y N-S (muestras Cuit-Fall- 25 y 30) de la zona de estudio se han encontrado este tipo de minerales, por lo cual estas fallas y fracturas han tenido actividad en los últimos 10mil años por lo cual han de considerarse como activas y como una zona de riesgo potencial por sismos superficiales. En cambio en estructuras que presentan cuarzo como mineral de relleno (Cuit-Fall-29 y 31) se han de considerar que su última actividad es mayor a 10 mil años por lo que se consideran inactivas.

En la Región Centro de la zona de estudio se puede observar una relación en las estructuras muestreadas a las cercanías del campo geotérmico de San Agustín del Maíz y San Agustín del Pulque, ya que en ambos casos (e incluso en la zona alterada intermedia de la Isla de las Serpientes), el mineral encontrado es la calcita y ambas se localizan en una zona de intersección de fallas NE-SW y las E-W (Fig. VIII.1).



Figura VIII.1. Se muestra un perfil geológico-estructural en que se observa la localización de las muestras más cercanas a los campos geotérmicos de San Agustín de Maíz (Cuit-Fall-42) y San Agustín del pulque (Cuit-Fall-24).

Con base a los resultados del estudio de Microscopía Electrónica de Barrido se considera que el crecimiento de los minerales se ve afectado por los esfuerzos presentes en un plano de falla, lo que queda reflejado en que incluso a nivel microscópico se siguen haciendo presentes los escalonamientos y estrías que se observan en las muestras a simple vista, además de que los minerales observados presentan los planos de crecimiento alargados en dirección al  $\sigma_2$  de las estructuras en que fueron recolectadas. Esto refleja hasta cierto punto un comportamiento fractal de los esfuerzos que afectan una estructura geológica, pudiendo observar evidencias de dichos esfuerzos desde escalas regionales hasta escalas microscópicas.

La Microtomografía realizada demuestra la relación entre la forma del crecimiento de los minerales neoformados y los periodos de actividad de la falla, ya que podemos observar que en las muestras analizadas se genera una mineralización que va de las paredes hacia el centro de la muestra, lo que es típico de estructuras con diferentes periodos de apertura o actividad en los que se reactiva la circulación de los fluidos, hasta que la mineralización sella el conducto.



## Capítulo IX. Conclusiones

En estos estudios un importante limitante para el muestreo es la accesibilidad a los afloramientos, ya que de ella depende el que se puedan obtener muestras con las características necesarias para que sean útiles, sin embargo se considera que las muestras recolectadas fueron suficientes para abarcar las diferentes regiones en la zona de estudio.

Los depósitos de minerales hidrotermales en las Regiones Suroeste y Norte evidencian la presencia de campos geotérmicos extintos o inactivos en la zona, siendo el primero el de menor temperatura o estando en una zona lejana de descarga del campo geotérmico que lo formó en base a los carbonatos encontrados; y el segundo es el de mayor temperatura o más cercano a la fuente de calor que lo generó.

Para las fallas normales con dirección preferencial E-W se observa una asociación mineralógica con características propias de una alteración propilítica, con rangos de temperatura bajo ( $200^{\circ}$ - $250^{\circ}$ C) y un pH neutro a alcalino, la presencia de celadonitas indica además que el depósito se generó en una parte distal del yacimiento geotérmico.

Las fallas secundarias se caracterizan por poseer minerales propios de una alteración argílica moderada, con rangos de temperatura de  $150^{\circ}$ - $200^{\circ}$ C, así como un pH de entre 3 y 4. Por otro lado la mineralogía identificada en las fallas normales de dirección N-S está más relacionada con una alteración propilítica.

Los depósitos de calcita en las fallas normales del sistema E-W y de las fallas N-S, se asocia a un régimen geotérmico con aguas ricas en carbonatos con rango de temperatura superiores a los de las fallas laterales ( $+200^{\circ}$ C) y las brechas de falla de los sistemas tanto E-W como N-S. Lo cual es indicativo de la existencia de diferentes eventos de alteración hidrotermal, los cuales estuvieron actuando a diferente tiempo dando lugar a depósitos diferentes en las fallas normales que en las laterales y secundarias.

Se refleja la reactivación de las estructuras del sistema N-S a causa de la del SFMA debido a que en zonas con alta densidad de fracturación ambos rellenos de fallas presentaban la misma mineralogía.

Con los estudios de MEB y Microtomografía, se han identificado elementos planares que se pueden agrupar en familias con un crecimiento característico. En base a esta información se podrá generar una base de datos para determinar la cronología de las fallas.

La datación de los minerales neoformados en la zona de Cuitzeo se ve limitada por la presencia de minerales secundarios, como es el caso de los carbonatos precipitados en los planos de falla que presentan en mayor o menor proporción impurezas de cuarzo y minerales arcillosos que impiden su datación mediante la aplicación de las técnicas actuales, como es el caso del U-Th en la que es necesario contar con un alto grado de pureza en la muestra para obtener resultados confiables.

Gracias a la identificación de la mineralogía de relleno, se ha mostrado que a pesar de que en algunos depósitos la calcita era el único mineral identificado, las muestras presentan gran cantidad de impurezas que limitan los métodos de datación de las mismas.

Con base en este estudio se puede concebir a los yacimientos termales de una manera dinámica con cambios constantes través del tiempo.



## Referencias

Arenivar B. A., Martínez G. C., Rivera L. I., 2012. "Evaluación fisicoquímica de arcillas naturales existentes en el campo geotérmico de Berlín, Usulután y elaboración del diagnóstico de su comportamiento reológico durante la perforación de pozos geotérmicos". Universidad de El Salvador. Tesis de licenciatura. Páginas: 164.

Arredondo-Fragoso J. J. 1983. "Levantamiento Gravimétrico en la zona central de la Laguna de Cuitzeo, Mich.". Informe 29-83. CFE Gerencia de proyectos geotermoeléctricos, subgerencia de estudios geotérmicos, departamento de exploración.

Anders M. H., Laubach S. E. y Scholz C. H. 2014. "*Microfractures: A review*". Journal of Structural Geology 69. Páginas: 377-394.

Barnicoat A. C., Sheldon H. A., Ord A. 2009. "*Faulting and fluid flow in porous rocks and sediments: implications for mineralisation and other processes*". *Miner Deposita* 44. Páginas: 705–718.

Barton, C.A., Zoback, M.D. y Moos, D., 1995. "*Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock*", *Geology*, Vol. 23, No. 8. Páginas: 683-686.

Bigurra-Pimentel E., Romero-León J. A. 1983. "Estudio Geofísico San Agustín del Maíz". Informe 28-83. CFE Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.

Demant A. 1978. "Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación". Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Revista 2. Páginas: 172-187.

Ferrari, L., Morán-Zenteno, D., González-Torres, E.A, 2007. "Actualización de la carta geológica de México, escala 1:4,000,000". Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Nuevo Atlas Nacional de México.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., 2012. “*The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone*”. Tectonophysics 522. Páginas: 122–149.

Forero-Herrera J. A., 2012. “Caracterización de las alteraciones hidrotermales en el flanco Noroccidental del Volcán Nevado del Ruiz, Colombia”. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias Bogotá D.C., Colombia. Tesis de maestría. 121 páginas.

Garduño-Monroy, V.H., Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1992. “Magmatismo, hiatus y tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano”. Geofísica Internacional. 31 (4). Páginas: 417–429.

Garduño-Monroy V. H., Pérez-López R., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Pascua M. A., Szykaruk E., Hernández-Madrigal V. M., García-Zepeda M. L., Corona-Chávez P., Ostroumov M., Medina-Vega V. H., García- Estrada G., Carranza O., López- Granados E. and Mora-Chaparro J. C. 2009. “*Paleoseismology of the Southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico*”. Geofísica Internacional. Vol. 48 (3). Páginas: 319-335.

Gómez-Tuena A., Orozco-Esquivel M. T., Ferrari L. 2005. “Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana”. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. V. LVII, núm. 3. Páginas: 227-283.

Gómez-Tuena, A., Langmuir, C.H., Goldstein, S.L., Straub, S.M., Ortega-Gutiérrez, F., 2007. “*Geochemical evidence for slab meeting in the Trans-Mexican Volcanic Belt*”. Journal of Petrology 48, Páginas: 537–562.

Gómez-Vazconcelos M. G., Garduño-Monroy V. H., Macias J. L., Layer P. W., Benowitz J. A., 2015. “*The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán, México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt*”. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol. 301. Páginas 128-147.

González-Ruiz. Luis E., González-Partida Eduardo, Garduño Monroy Víctor Hugo, Martínez L., Pironon J., Díaz-Carreño Erik Hugo, Yáñez-Dávila David, Romero Rojas Wendy, Romero-Rojas Mary Carmen. 2015. "Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica". Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, Página principal: [www.riit.com.mx](http://www.riit.com.mx) ISSN: 2007-9753.

Herdianita N. R., P. R. L. Browne, K. A. Rodgers, K. A. Campbell, 2000. "*Mineralogical and textural changes accompanying ageing of silica sinter*". *Mineralium Deposita* 35. Department of Geology, University of Auckland, Private Bag 92019, Auckland, New Zealand. Páginas :48-62.

Hiriart, L.B.G., Gutiérrez-Negrín, L.C.A., Quijano-León, J.L., Ornelas-Celis, A., Espíndola, S., and Hernández, I., 2011. "Evaluación de la Energía Geotérmica en México. In: Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, D.F., México". Páginas: 167.

Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., y Ortega-Murillo, R. 2002. "Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo". *Hidrobiológica*, 12(1). Páginas: 61-78.

Israde-Alcántara I., Cram S. y Galicia L. 2010. "Atlas de la cuenca del Lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y su entorno Socioambiental". ISBN: 978-607-02-1830-9. Primera edición. Morelia, Michoacán, México. 311 paginas.

Kocabas C., Tokcaer M., Colak M., 2016. "*Clay Mineralogy and Geochemistry of Fossil and Active Hydrothermal Alteration in the Hisaralan Geothermal Field (Sındırgı-Balıkesir), western Turkey*". *Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering*, 16. 015801. Páginas: 132-154.

Maciel-Rivera, A. E. 2015. "Contribución al estudio geológico-estructural de la sierra de San Andrés, Gto y sus implicaciones con el yacimiento geotérmico de la zona de Araró, Mich.". Tesis de Licenciatura. Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro, Tacámbaro, México. 76 páginas.

Medina-Vega, V. H. 2008. “Estudio geológico, geofísico e hidrogeoquímico para generar un modelo conceptual del acuífero de Cuitzeo, Michoacán México”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. Tesis de Maestría. 179 páginas.

Menella, L. 2011. “Sismotectónica del sector occidental del sistema Morelia-Acambay, México, a partir del análisis de poblaciones de fallas”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de maestría. 151 páginas.

Mizoguchi K. y Ueta K. 2013. “*Microfractures within the fault damage zone record the history of fault activity*”. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40. Páginas 2023–2027, doi:10.1002/grl.50469.

Moore D. E., Hickman S., Lockner D. A. y Dudson P. F. 2001. “*Hydrothermal minerals and microstructures in the Silangkitang geothermal field along the Great Sumatran fault zone, Sumatra, Indonesia*”. *GSA Bulletin*; v. 113; no. 9. Páginas: 1179–1192.

Nyandigisi J., Katana C., 2016. “*High temperature hydrothermal alteration in active geothermal systems a case study of Olkaria Domes*”. *Proceedings, 6th African Rift Geothermal Conference Addis Ababa, Ethiopia*, 2nd – 4th Noviembre 2016.

Segovia N, Barragán R. M., Tello E., Alfaro R, Mena M. 2005. “*Geochemical Characteristics and <sup>222</sup>Rn Measurements at Cuitzeo Basin (Mexico) Thermal Springs and Artesian Wells*”. *Proceedings World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey*. Páginas: 24-29.

Rentería-Ortega Ana Victoria, 2015. “Contribución al conocimiento geológico y geotérmico de la zona de Araró Michoacán”. Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro. Tacámbaro, Michoacán, México. Tesis de licenciatura. 101 páginas.

Ruggieri G., Petrone C. M., Gianelli G., Arias A., Torio-Henriquez E., 2006. “Hydrothermal alteration in the Berlin geothermal field (El Salvador): new data and discussion on the natural state of the system”. *Periodico di Mineralogia*, 75, 2-3. Páginas: 293-312.

Sausse J., Center A., 2016. "Types of permeable fractures in granite". *Petrophysical Properties of Crystalline Rocks. Geological Society, London, Special Publications*, 240. Páginas: 1-14.

Suter M., Quintero-Legorreta O., Lopez-Martinez M., Aguirre-Diaz G., y Farrar E., 1995. "The Acambay Graben: active intraarc extension in the trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico". *Tectonics*, Vol. 14, No. 5, Páginas: 1245-1262, December 1995. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Hermosillo, Sonora, México.

Olvera-García, E. 2017. "Estudio de geología estructural, mineralógico y de litofacies de los depósitos hidrotermales de San Agustín del Maíz e Ixtlán de los Hervores, Michoacán: enfocado a la exploración geotérmica". Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. 122 páginas.

Ostrooumov M., 2009. "MINERALOGÍA AVANZADA". Libro. Fondo Editorial Morevallado. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Morelia Michoacán, México.

Pasquare. G., Garduño V.H., Tibaldi A. y Ferrari M., 1988. "Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt". *The Origin and Evolution of Arcs. Tectonophysics*. 146. Páginas: 353-364.

Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., y Vezzoli, L. 1991. "Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico". *Geological Society of America*. Páginas: 21.

Pardo, M. and Suárez, G., 1995. "Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Sismic and tectonic implications". *Journal of Geophysical Research*, 100. Páginas: 12357-12373.

Pérez-Segura E., Cheilletz A., Herrera-Urbina S., Hanes Y. J., 1996. "Geología, Mineralización, alteración hidrotermal y edad del yacimiento de Oro de San Francisco, Sonora – un deposito mesotermal en el Noreste de Mexico. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, volumen 13, numero 1. Páginas: 65-89.

Tagami Takahiro. 2012. "*Thermochronological investigation of fault zones. Tectonophysics*". 538–540. Páginas: 67–85.

Tello-Hinojosa, E., Quijano-León, J.L. 1984. "Reconocimiento y evaluación geoquímica de las zonas termales del Lago de Cuitzeo". Informe 33-83. CFE, Subgerencia de estudios, Departamento de Exploración.

Tripp, G. I., & Vearncombe, J. R. 2004. "*Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration*". *Journal of Structural Geology*, 26. Páginas: 1087-1108.

Trujillo-Hernández, N. 2017. "Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México. Tesis de Maestría. 110 páginas.

Vargas-Ledesma H. 1985. "Sinopsis del estudio geohidrológico los Azufres-Cuitzeo, Estado de Michoacán". Reporte GG 1/85. CFE Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Departamento de Exploración.



# ANEXOS

A continuación se presentan los resultados de los análisis de los estudios de Difracción de Rayos X y Espectroscopia Infrarroja, realizados a las muestras presentadas en este estudio. A la izquierda se muestran los Difractogramas de Rayos X y a la derecha los Espectrogramas de Infrarrojo correspondientes a cada muestra analizada:

