



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA**



---

---

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA  
ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

PRESENTA:

**TANIA LUCIA GASPAR PATARROYO**

ASESOR:

**DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY**

MORELIA, MICHOACÁN.

AGOSTO, 2017



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

**Dedicatoria**

*A mi mamá y hermana, mis maestras.*

*A la hermosa gente del municipio de Ixtlán de los Hervores.*



## Agradecimientos

Expreso mi gratitud con el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, sin su apoyo no hubiese sido posible el desarrollo de este trabajo de investigación, ni la continuación con mis estudios de postgrado. ¡Gracias por el fomentar el desarrollo tecnológico y científico!

A la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)**, al **Instituto en Investigaciones en Ciencias de la Tierra (INICYT)** y el programa de **Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio (MGyPT)**, por permitirme ser parte de tan prestigioso postgrado y brindarme educación de alta calidad científica y humana.

Al **Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy**, por su paciencia y apoyo incondicional, crucial para el desarrollo de este trabajo de investigación. Muchas gracias por compartir sus conocimientos e impulsarme hacia la innovación.

A mis sinodales, **Dr. José Luis Macías**, **Dr. Mikhail Ostroumov**, **Dr. Ángel Figueroa** y **Dra. Isabel Israde** y por su asesoría y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo. A la **Dra. Marnie Forster** y su equipo por su apoyo con los análisis geocronológicos.

Al **Centro Mexicano en Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo)** por fomentar y apoyar la investigación científica con énfasis en la exploración geotérmica. Asimismo, agradezco la educación recibida a través de cursos cortos que contribuyeron ampliamente en mi formación.

A todos mis compañeros del **Proyecto 17 del CeMIEGeo**, por su asesoría e intercambio de conocimientos para el desarrollo de esta investigación.

A **Instituto de Geofísica UNAM, Unidad Michoacán** por la educación brindada a través de cursos que contribuyeron a mi formación, también a sus profesores y técnicos en especial a el **M.C. Felipe García Tenorio** y a la **M.C. Fabiola Mendiola** por su apoyo en las labores de laboratorio que fueron fundamentales para el análisis de muestras de roca.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

A **Fomento Turístico de Michoacán (FORTUMICH)** y el **Ayuntamiento de Ixtlán de los Hervores 2015-2018** en sus departamentos de **presidencia, protección civil y policía municipal** por las facilidades prestadas y acompañamiento en el desarrollo del trabajo de campo.

Al **Ing. Miguel Ángel Torres Cervantes** y familia.

A los **M.C Susana Osorio Ocampo, M.C Noemí Trujillo Hernández, Ing. Abraham Del Razo, Ing. Adrián Jiménez** y **M.C Jorge Alejandro Guevara Alday**, por sus enseñanzas tanto académicas como personales.

A mis profesores de la **Universidad de Caldas** (Colombia), en especial a la **M.C Elvira Cristina Ruiz Jiménez**, por la formación académica que me brindaron durante mi pregrado en Geología, así como por impulsarme a continuar con mi educación con énfasis en el área de la Geotermia.

**A todo aquel que contribuyó para la realización de este trabajo.**

A México y a Colombia.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

## Índice

Dedicatoria .....	2
Agradecimientos.....	3
Índice .....	5
Índice de Figuras.....	8
Índice de Tablas .....	12
Resumen .....	12
Abstract.....	14
Introducción.....	15
Capítulo I. Generalidades .....	18
I.I Justificación.....	18
I.II Objetivos General y específicos.....	19
I.III Zona de estudio .....	19
Capítulo II. Estado del Arte .....	21
II.I Antecedentes.....	21
II.II Contexto Vulcano-tectónico.....	24
II.III Geología.....	29
II.III.I Hidrología .....	31
II.IV Geoquímica de agua y gases .....	31
II.V Geofísica .....	34
II.VI Información de perforaciones.....	39
II.VII Potencial geotérmico .....	41
Capítulo III. Marco teórico.....	43
III.I Contexto tectónico y play geotérmico .....	44
III.II Play geotérmico.....	43
III.II.I Modelos Conceptuales .....	44
III.III Técnicas exploratorias en geotermia .....	47
III.III.I Sensores remotos.....	47



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

III.III.II Vulcanología de campo .....	47
III.III.III Catálogo de manifestaciones hidrotermales.....	48
III.III. IV Geología estructural .....	48
III.IV Técnicas Geofísicas .....	50
III.IV.I Magnetometría .....	50
Capítulo IV. Metodología.....	52
IV.I Geología.....	53
IV.I.I Geología superficial del subsuelo.....	54
IV.II Vulcanología .....	55
IV.II.I Petrografía.....	55
IV.II.II Geoquímica.....	57
IV.II.III Geocronología .....	59
IV.III Geología Estructural .....	61
IV.IV Magnetometría.....	63
Capítulo V. Resultados.....	69
V.I Estratigrafía .....	70
V.I.I Estratigrafía Local .....	70
V.II Cartografía Geológica.....	70
V.III Vulcanología .....	81
V.III.I Geoquímica.....	86
V.III.II Geocronología .....	91
V.IV Geología Estructural.....	92
V.IV.I Distribución de Manifestaciones Hidrotermales .....	97
V.V Magnetometría .....	101
V.VI Secciones Geológicas .....	106
V.VI.I Geometría del Yacimiento .....	110
V.VII Modelo Conceptual.....	112
Capítulo VI. Discusión .....	114
Perspectiva .....	121
Conclusiones.....	122



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

Referencias ..... 126

Anexos ..... 133

    Anexos Petrografía ..... 136



## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama Lindal, usos de la energía geotérmica (Claire, 2016) .....	16
Figura 2. Campos geotérmicos de México bajo la explotación actual (AGM, 2017) .....	17
Figura 3. Mapa de localización de la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (ZGIH).....	200
Figura 4. Cartografía de las manifestaciones hidrotermales entre los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre (Waitz, 1906).....	21
Figura 5. Secuencia fotográfica de la actividad del 10 de abril de 2006 de Pozo N.º 1, tomada de Torres-Cervantes, 2009. ....	22
Figura 6. Pozo N.º 1, “Géiser de los Hervores” ubicado en el área de la unidad deportiva de la población de Ixtlán de los Hervores, Michoacán.....	22
Figura 7. Área del Centro Recreativo “El Géiser de Ixtlán” (Pozo N.º 2), Ixtlán de los Hervores, Michoacán.....	23
Figura 8. Fotografía del Pozo N°3 por Marcos Rodríguez del día 13 de septiembre de 2006, tomada de Torres-Cervantes, 2009.....	24
Figura 9. Cinturon Volcánico Transmexicano .....	25
Figura 10. Evolución del CVTM por Gómez-Tuena <i>et al.</i> , (2005) .....	26
Figura 11. Marco vulcano-tectónico en el que está inmersa la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores .....	28
Figura 12. Mapa geológico regional según Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2006 .....	30
Figura 13. Diagrama de Piper con los datos del Anexo, 1. Nótese que la composición química del agua geotérmica de la zona de estudio .....	32
Figura 14. Composición Isotópica de manantiales termales de Ixtlán de los Hervores (Tello, 1986) con tendencia a la línea de mezcla.....	32
Figura 15. Estudios de resistividad llevados a cabo por CFE en Banwell y Gómez (1970)....	35
Figura 16. Anomalía de Bouguer completa (contornos cada 2 mGal) y perfiles gravimétricos. Tomado de Ortiz Prieto, (2007) .....	36
Figura 17. Mapa aeromagnético del área obtenido por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en 1998. Carta Magnética de Pajacuarán (CT_F13-D88_GF).....	38
Figura 18. Columna litológica establecida a través del estudio de los ripios de la perforación N°3 (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007). ....	40
Figura 19. Modelo esquemático del probable sistema geotérmico de Ixtlán de los Hervores (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007) .....	41
Figura 20. Contexto tectónico de los principales campos geotérmicos mundiales y relación con el play geotérmico (Moeck, 2014).....	45
Figura 21. Modelos conceptuales de reservorios geotérmicos a 250-300°C (Cumming, 2009) .....	47



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Figura 22. Escenarios estructurales favorables para el ascenso de fluidos hidrotermales (Ejemplos de la Región del Great Basin, oeste de EEUU). Imagen tomada de Faults y Hinz (2015).....	49
Figura 23. Diagrama de flujo que ilustra las ocho etapas de la presente investigación. ....	52
Figura 24. Ejemplo de diferenciación entre el fracturamiento por enfriamiento del fracturamiento y fallamiento producido por procesos tectónicos .....	53
Figura 25. Ejemplo de sondeos geológicos realizados en el predio del Centro recreativo “El Géiser de Ixtlán” .....	54
Figura 26. En esta imagen se observa como las láminas delgadas después de ser pegadas a sus portaobjetos son sometidas por segunda vez a abrasivos .....	56
Figura 27. Ejemplo de fichas que se pueden consultar en el apartado Anexos petrografía. ....	57
Figura 28. Discos de la Pulverizadora con residuos de una primera pulverización, dicho polvo funcionó como material de limpieza .....	58
Figura 29. Localización de las muestras seleccionadas para Petrografía, geoquímica y Geocronología <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar. ....	60
Figura 30. Ejemplo del tensor de esfuerzos calculado por el software WinTensor V.5.0.1, para la Falla Nogales. ....	61
Figura 31. Ejemplo de medición de temperatura en manantial hidrotermal con pirómetro infrarrojo. Manantial el Pozo Loco. ....	62
Figura 32. Magnetómetros de precesión protónica G-857, estación base utilizada en el área de Ixtlán de los Hervores. ....	63
Figura 33. Muestreo magnetométrico en la zona de Ixtlán. ....	65
Figura 34. Gráficos para análisis geoestadístico de los datos de campo magnético adquiridos y corregidos obtenidos a través del Geostatistical Wizard de ArcMap.....	68
Figura 35. Interpolación de los datos de campo magnético total con el método Kriging Simple Ordinario.....	69
Figura 36. Mapa geológico de la ZGIH.....	70
Figura 37. Ejemplos de fósiles y cristales observados en <i>SPm</i> .....	72
Figura 38. Distribución de los sondeos geológicos.....	75
Figura 39. Perfil de dirección NO-SE donde se correlacionan seis columnas estratigráficas .....	77
Figura 40. Perfil de dirección NO-SE en el cual se correlacionaron cinco columnas estratigráficas .....	78
Figura 41. Perfil de dirección N-S donde se correlacionaron 5 columnas estratigráficas y se representa la ubicación del Pozo N°3.....	79
Figura 42. Perfil de dirección NE-SO donde se correlacionan tres columnas estratigráficas y se representa el Pozo N°2, conocido como el “Géiser de Ixtlán” .....	80



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Figura 43. Fotografías ejemplo de la cerámica encontrada en el área de los pozos N°1 y N° 2. ....	81
Figura 44. Cono cinerítico Las Chivas .....	82
Figura 45. Depósito de corriente de densidad piroclástica diluida (CDPd), parte de la evolución del Cono Cinerítico Las Chivas. ....	82
Figura 46. Imágenes de uno de los conos de escoria parte del lineamiento NO-SE Las Chivas-Trompeta. ....	83
Figura 47. Eventos efusivos de construcción de volcanes semi-escudo .....	84
Figura 48. Fotografías del lado oriental de la Barranca del Cerezo, sector conocido como “La Virgen” (Trazo de la Falla Nogales) donde es posible observar la brecha eruptiva del volcán Nogales. ....	84
Figura 49. Lava Gigante sobre la carretera.....	85
Figura 50. Localización de las muestras seleccionadas para análisis geoquímico. ....	86
Figura 51. Diagrama TAS (Na <sub>2</sub> O vs SiO <sub>2</sub> ) propuesto por Le Bas et al., (1986).....	87
Figura 52. Línea discriminante de Irvine y Baragar (1971).....	87
Figura 53. Diagrama (K <sub>2</sub> O vs SiO <sub>2</sub> ) propuesto por Peccerillo y Taylor (1976) .....	88
Figura 54. Diagrama triangular AFM (Álcalis, Hierro total y Magnesio) de Irvine y Baragar (1971).....	89
Figura 55. Diagrama de tierras raras (REE) normalizado al Condrito (Sun y McDonough, 1989). ....	90
Figura 56. Diagrama multielementos normalizado a manto primitivo, valores de normalización según Sun y McDonough, (1989). ....	91
Figura 57. Diagrama de bigotes y cajas donde se ilustra la concentración de la actividad volcánica de Ixtlán (en verde), asimismo las líneas rojas punteadas corresponden al fallamiento sobreimpuesto a dicho edificio volcánico.....	92
Figura 58. Mapa estructural de la ZGIH.....	93
Figura 59. Campo de esfuerzos calculado para la Falla Ixtlán y fotografía de campo. ....	95
Figura 60. Campo de esfuerzos calculado para la Falla Nogales en sus dos fases de deformación. ....	96
Figura 61. Mapa estructural de la ZGIH con los diagramas y tensores de esfuerzo (derecha) y movimiento relativo de las fallas.....	97
Figura 62. Relación entre las principales estructuras y la distribución de manifestaciones de la ZGIH.....	99
Figura 63. Imágenes de las manifestaciones hidrotermales presentes en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores .....	100
Figura 64. Imagen del volcán de lodo emergido el día 12 de enero de 2016. ....	100
Figura 65. Mapa de modelo digital de elevaciones sobrepuesto con los valores de campo magnético reducidos al polo (CTRP).....	101



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Figura 66. Mapa de valores de Campo Total con filtros de Reducción al Polo y Primera Derivada Vertical (1aDz) .....	103
Figura 67. Mapa de Continuación Ascendente a 300 metros (RP CA 300) .....	104
Figura 68. Modelo 3D del campo magnético reducido al polo residual (CMRP-residual).105	
Figura 69. Perfiles geológicos A-A´; B-B´ y C-C´ sobre mapa geológico de la ZGIH. ....	106
Figura 70. Perfil A-A´ .....	107
Figura 71. Perfil B-B´, con el reconocimiento de los elementos del sistema geotérmico..	108
Figura 72. Perfil C-C´ .....	109
Figura 73. Geometría y perfiles .....	111
Figura 74. Modelo Conceptual de la ZGIH.....	113



## Índice de Tablas

Tabla 1. Composición isotópica y concentración ( $10^4$ ppm) de gases de la ZGIH. Tomado de Polak et al., (1982, 1985). .....	33
Tabla 2. Parámetros utilizados para la modelación del potencial geotérmico de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores (Hiriart <i>et al.</i> , 2011) .....	42
Tabla 3. Catálogo de Plays Geotérmicos, resumen basado en Moeck, (2014). .....	44
Tabla 4. Especificaciones del Magnetómetro G-857 Geometrics. ....	63
Tabla 5. La tabla muestra las edades calculadas a través del método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , para cada muestra.....	91
Tabla 6. Resumen de las manifestaciones hidrotermales más relevantes por su tamaño como por su temperatura y una breve descripción de sus características.....	98



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

**Resumen**

La Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (ZGIH) se sitúa la conjunción de dos regímenes tectónicos, uno transtensivo asociado a la tectónica del sector central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y otro extensivo que caracteriza el occidente mexicano asociado al actual punto triple o bien la fragmentación del sur de México. Dado este contexto, los alrededores de la ZGIH presentan vulcanismo monogenético y depósitos sedimentarios del paleolago de Chapala, así como una geometría estructural idónea que permitió el desarrollo de un sistema geotérmico de mediana a baja entalpía.

La actividad volcánica de la zona es principalmente efusiva y se caracteriza por ser de composición andesítico basáltica a dacítica de afinidad calco-alcalina, la cual se desarrolló entre 2.2 y 1.2 Ma; no obstante, los eventos del Oligoceno-Mioceno están ocultos y corresponden al reservorio del sistema geotérmico. Desde el punto de vista estructural, las fallas principales en la zona de estudio son: la falla Ixtlán de dirección NO-SE y falla Nogales de dirección NE-SO, ambas normales con movimientos laterales izquierdos que favorecen la permeabilidad debido a la fricción entre bloques. Por su parte, la falla Ixtlán responde a la tectónica extensiva del occidente mexicano y controla el ascenso de fluidos, mientras la falla Nogales que responde a la transtensión del sector central del CVTM los limita.

La interacción de estas estructuras orientadas favorablemente a los campos de esfuerzos actuales configura un escenario estructural de intersección de fallas, que permitió el desarrollo una geometría que respecto al cruce de fallas sella al yacimiento geotérmico al norte con un horst y al sur con un graben, mientras al oeste acerca virtualmente el reservorio a través de un semi-graben. En cuanto a la fuente de calor, dado el contexto extensional, la hipótesis más fuerte apuntaría a que es producto del gradiente geotérmico anómalamente elevado, no obstante, gracias a un estudio magnetométrico se infiere que el calor también es aportado por un dique relacionado con las últimas fases del vulcanismo; entendiéndose que el modelo conceptual de Ixtlán es híbrido.

*Palabras clave: Transtensión, extensión, vulcanismo, escenario estructural favorable, intersección de fallas, sistema geotérmico.*



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

**Abstract**

The Ixtlan de los Hervores Geothermal Area (IHGA) has been developed in the combination of two tectonic regimes. One transtensive associated to the tectonics of the central sector of the Transmexican Volcanic Belt (TMVB) and other extensive associated with the current triple junction area related to west TMVB or the fragmentation of southern Mexico. Given this tectonic framework, the surroundings of the IHGA present monogenetic volcanism and sedimentary deposits of the Chapala paleolake, as well as a suitable structural setting that allowed the development of a medium to low enthalpy geothermal system.

The mainly effusive volcanic activity of the zone is andesitic basaltic to dacitic in composition and it is related to calc-alkaline magma series, which was developed between 2.2 and 1.2 Ma. However, the Oligocene-Miocene age units are hidden and correspond to the geothermal system reservoir. From the structural point of view, the main faults in the study area are the Ixtlan fault with NW-SE direction and the Nogales fault with NE-SW direction, both normal with left lateral components. The left lateral movements favor the permeability due to friction between blocks. The Ixtlan fault works with the extensive tectonics of western Mexico and controls the upflow, while the Nogales fault responds to the transtensive of the central sector of the TMVB and it limits the geothermal activity.

The cross-fault interaction of these positively oriented structures with the current stress fields allowed the development of a favorable setting for geothermal upflow. From the cross-fault, the geothermal system is closed by a horst in the north area and by a graben at the south one, while a semi-graben virtually brings up the reservoir at the West area. Given this extensional framework, the strongest hypothesis would suggest that the IHGA heat source is the anomalously elevated geothermal gradient, however, thanks to a magnetometric study, the presence of a magnetic body has been identified and it is related to the last phases of volcanism, therefore, it also provides heat to the reservoir. Deducting that the conceptual model of IHGA is hybrid.

*Key Words: Transtensive, extension, volcanism, favorable structural setting, fault intersection, geothermal system*



## Introducción

La demanda de energía eléctrica se irá acrecentando a través de los años y aún más con el acelerado crecimiento de la población mundial, la cual se cree que para el final del siglo XXI se duplicará; de hecho, hay personas que no tienen acceso a la energía eléctrica, razón por la cual se hace necesaria la investigación y fortalecimiento en el conocimiento de fuentes energéticas alternas para mejorar la calidad de vida de la población (Fridleifsson, 2001). Los recursos geotérmicos representan una excelente alternativa dado que pueden ser extraídos y usados responsablemente y a bajos costos en comparación con otras fuentes energéticas como los combustibles fósiles (Barbier 2002). Asimismo, la geotermia es una fuente renovable de energía y su utilización se ha incrementado en las últimas cuatro décadas, produciéndose comercialmente desde 1913; sin embargo, tan solo una pequeña fracción de su potencial es la que se utiliza, tanto para producción de energía eléctrica como para uso directo. (Fridleifsson, 2001). En la Figura 1, se muestra el amplio espectro de usos no solo para generación de energía eléctrica, sino también las utilidades directas de la energía geotérmica.

La energía geotérmica proviene y reside en el interior de la Tierra, su origen está ligado directamente a la estructura del planeta y los procesos físicos que en esta ocurren; el gradiente geotérmico es aproximadamente 30°C por kilómetro de profundidad en la corteza, sin embargo hay áreas donde este gradiente es superior dado que cercanamente hay cámaras magmáticas en proceso de enfriamiento que proveen el calor necesario para crear dichas anomalías térmicas; no obstante, en otras áreas donde el calor no está relacionado al magmatismo la anomalía se presenta por condiciones geológicas particulares, como por ejemplo en cuencas extensionales (Barbier, 2002).



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO



Figura 1. Diagrama Lindal, usos de la energía geotérmica (Claire, 2016)

*Energía geotérmica en México*

La exploración geotérmica inicia en la República Mexicana en 1951 con el planteamiento del Ing. Cortés Herrera de estudiar la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (Romero Ríos *et al.*, 1988). La explotación del recurso geotérmico inicia en México en 1959, con la operación de la primera unidad geotermoeléctrica de 3.5 MW de capacidad, en el campo geotérmico de Pathé, Hidalgo, que actualmente no está en operación (Hiriart, 2011).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Actualmente, México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en generación de energía eléctrica a través de la geotermia con una capacidad instalada de 983.7 *Mega Watts* eléctricos (MWe), distribuidos en cuatro campos geotérmicos propiedad de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y operados por esta misma entidad y uno operado por Grupo Dragón (AGM, 2016) (Fig. 2). Sin embargo, los usos directos de la energía geotérmica en México están limitados a balnearios; no obstante, hay una expectativa de desarrollo y fortalecimiento de la energía geotérmica gracias a la fundación del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CEMIE-Geo), pues están desarrollando proyectos para poner en funcionamiento campos de mediana y baja entalpía (Gutiérrez-Negrín *et al.*, 2015). Por lo anterior, las posibilidades de uso van más allá y México progresa paso a paso hacia Proyectos en Cascada, es decir, implementando otros usos de la energía geotérmica a partir del calor residual de los fluidos utilizados en futuras plantas geotermoeléctricas.



Figura 2. Campos geotérmicos de México bajo la explotación actual (AGM, 2017)



## Capítulo I. Generalidades

### I.1 Justificación

Los estudios de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Estudios Geotermoeléctricos han resaltado la importancia de la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores; pese a ello, no es considerada para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, sus características y propiedades geotérmicas son potenciales para el desarrollo de un campo geotérmico de mediana a baja entalpía. El presente proyecto de tesis será una herramienta valiosa para la continuación de su exploración y futura explotación al maximizar las probabilidades de éxito en la ubicación de pozos exploratorios y el correcto manejo del recurso geotérmico.

También esta investigación será un instrumento para plantear el aprovechamiento del calor a través de Proyectos en Cascada o usando ciclo binario; innovando en México al poder plantear otros usos del calor geotérmico a través de invernaderos, plantas de secado de madera, deshidratadoras de frutas y verduras, concentración de minerales industriales, procesos industriales, piscicultura, etc. y no limitándose exclusivamente a balnearios como acontece en esta zona.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

**I.II Objetivos General y específicos**

Definir el modelo conceptual geológico-vulcanológico-estructural de la zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (ZGIH) con la visión que sea una herramienta para la exploración geofísica y su futura explotación.

Por medio de los siguientes objetivos específicos en el área circundante a la ZGIH:

1. Investigar desde el punto de vista geológico-vulcanológico-estructural la ZGIH a través de una cartografía detallada.
2. Realizar el levantamiento de fallas en las unidades que componen el yacimiento geotérmico, enfatizando en aquellas que han tenido actividad reciente, teniendo en cuenta el contexto tectónico regional.
3. Comprender los procesos magmáticos e identificar los marcadores petrogenéticos de los principales edificios volcánicos a través de la caracterización geoquímica y apoyo en la petrografía.
4. Definir la evolución volcánica e hidrotermal, con apoyo de la estratigrafía volcánica y fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de los principales edificios volcánicos.
5. Realizar un estudio magnetométrico en el área cercana al ascenso de fluidos hidrotermales, para definir anomalías relacionadas a trazos de fallas ocultas bajo los sedimentos del Valle de Ixtlán, así como la prospección de la posible fuente de calor del yacimiento geotérmico.

**I.III Zona de estudio**

La Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (ZGIH) está ubicada en el sector noroccidental del estado de Michoacán, México; cerca del límite con el estado de Jalisco, comprende los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre; se encuentra a 27 kilómetros en dirección NE de la zona geotérmica de Los Negritos y a unos 175 km al noroeste de la ciudad de Morelia. Las principales vías de acceso son las carreteras Zamora-La Barca (Federal N.º 35) y La Barca-Sahuayo (Estatad N.º 15D) (Fig. 3).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

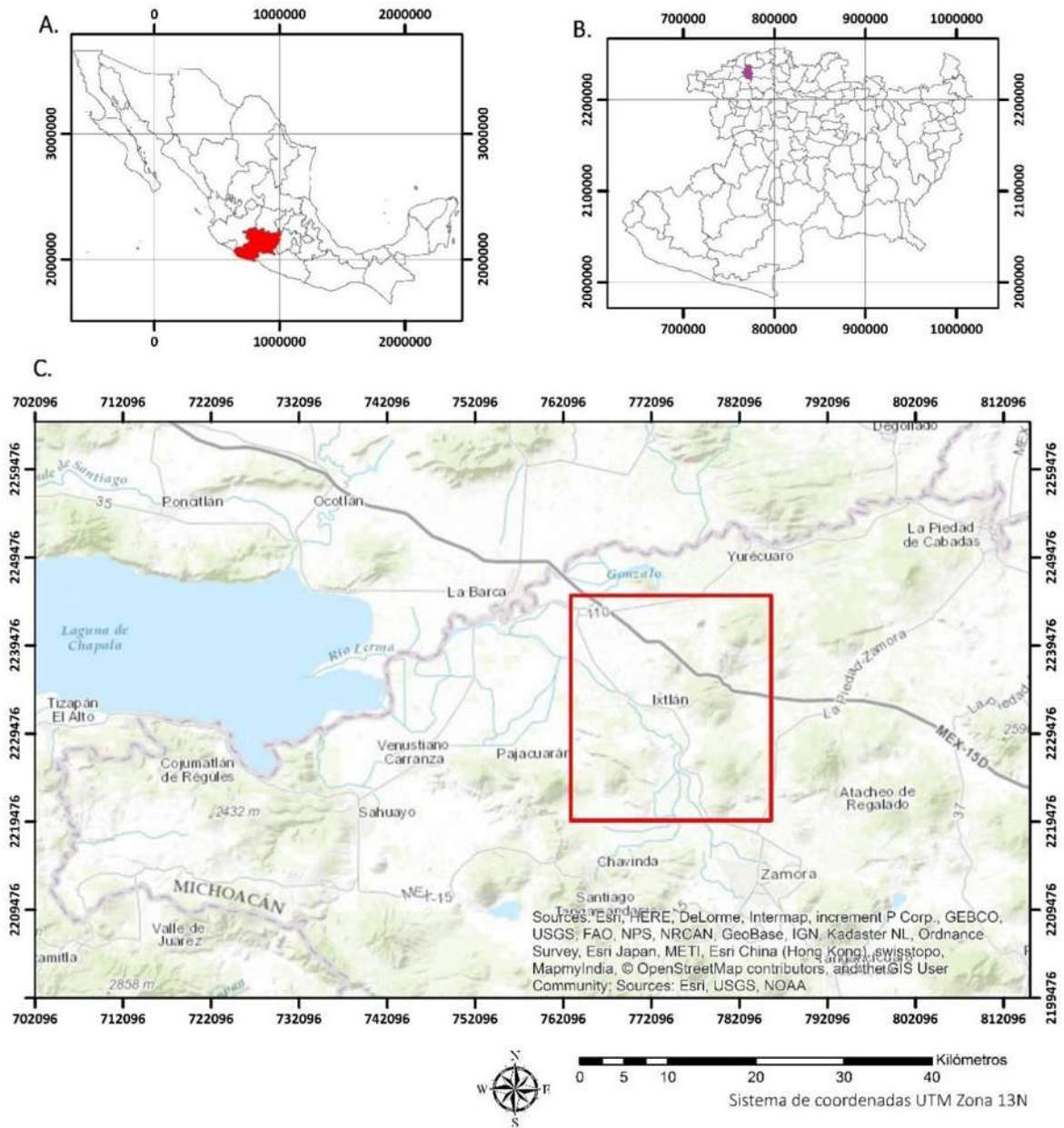


Figura 3. Mapa de localización de la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (ZGIH) **A.** República Mexicana y estado de Michoacán (rojo). **B.** Estado de Michoacán y municipio de Ixtlán de los Hervores (purpura). **C.** Mapa de localización y área que abarca la zona de estudio (recuadro rojo).



## Capítulo II. Estado del Arte

### II.1 Antecedentes

Paul Waitz en 1906 realizó el primer estudio geológico de la ZGIH, elaboró una cartografía de las manifestaciones hidrotermales e identificó más de 600 fuentes de ebullición permanente, conos y volcanes de lodo activos y no activos ( $>70^{\circ}\text{C}$ ), emanaciones de vapor, manantiales de agua, fría y tibia, así como géiseres que se activan con cierta periodicidad y en grupos con una clara tendencia NO-SE que le permitió identificar una zona de actividad hidrotermal entre los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre, Michoacán (Fig. 4). Asimismo, Waitz (1906) menciona temperaturas máximas de  $93^{\circ}\text{C}$ , depósitos de sinter y brechas asociadas a erupciones hidrotermales.

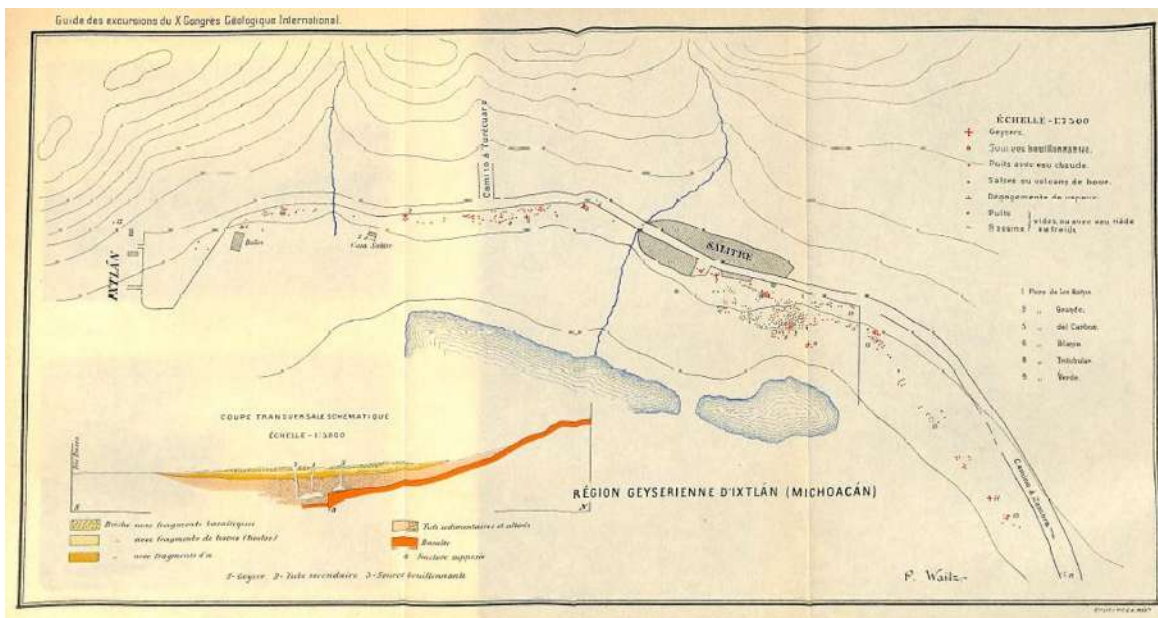


Figura 4. Cartografía de las manifestaciones hidrotermales entre los poblados de Ixtlán de los Hervores y El Salitre (Waitz, 1906).

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Entre 1956 y 1957 la Comisión Federal de Electricidad (CFE) perforó el Pozo N.º 1 (Banwell y Gómez-Valle, 1970), conocido como “Géiser de los Hervores”. Esta perforación presentó actividad el día 10 de abril de 2006 arrojando bloques de roca y minerales como calcita y pirita después de 51 años de inactividad; y presentó otras reactivaciones en los años 2011, 2013, 2014 (Fig. 5; Torres-Cervantes, 2009) y en julio de 2017. Comúnmente tiene un comportamiento pasivo que suele consistir tan solo de emanaciones de vapor y/o agua (Fig. 6).



Figura 5. Secuencia fotográfica de la actividad del 10 de abril de 2006 de Pozo N.º 1, tomada de Torres-Cervantes, 2009.



Figura 6. Pozo N.º 1, “Géiser de los Hervores” ubicado en el área de la unidad deportiva de la población de Ixtlán de los Hervores, Michoacán. **A.** Fotografía de noviembre de 2015 **B.** Fotografía de la reactivación de julio de 2017.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Posteriormente, entre 1957 y 1958, CFE perforó el Pozo N.º 2 pero al llegar a los 49.5 metros el agua empezó a fluir y se convirtió en el atractivo turístico conocido actualmente como “El Géiser de Ixtlán” (Fig. 7), el cual tuvo un flujo ininterrumpido de agua por 35 años (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007; Torres-Cervantes, 2009); no obstante, en la actualidad se activa casi a diario y es el atractivo principal del centro recreativo “El Géiser de Ixtlán” e insignia de la población de Ixtlán de los Hervores.



Figura 7. Área del Centro Recreativo “El Géiser de Ixtlán” (Pozo N.º 2), Ixtlán de los Hervores, Michoacán.

Entre octubre de 2004 y enero de 2005 el Gobierno del Estado de Michoacán solicitó a CFE el apoyo para la localización y perforación de un pozo (Pozo N°3, Fig. 8), ello con el objetivo de reemplazar si es necesario al “El Géiser de Ixtlán” (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007).

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO



Figura 8. Fotografía del Pozo N°3 por Marcos Rodríguez del día 13 de septiembre de 2006, tomada de Torres-Cervantes, 2009.

## **II.II Contexto Vulcano-tectónico**

### *Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)*

El CVTM es un arco volcánico que atraviesa a México de este a oeste, tiene aproximadamente 1000 km de longitud y un ancho variable, entre 80 y 230 km; se encuentra construido sobre la parte sur de la placa de Norteamérica, la cual es subducida por la placa Cocos y la microplaca Rivera; las cuales han controlado de forma directa o indirecta sus múltiples singularidades, como su orientación general E-O, oblicua a la trinchera (Fig. 9A) y las diferentes afinidades geoquímicas de su vulcanismo, están posiblemente asociadas a la variabilidad química de la corteza subyacente (Gómez-Tuena *et al.*, 2005 ; Ferrari *et al.*, 2012).

# MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

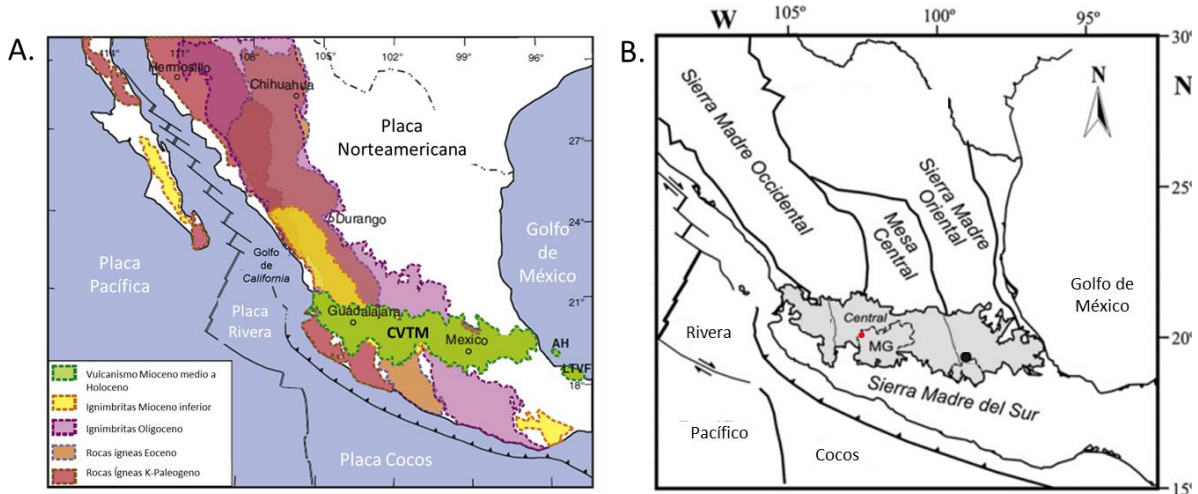


Figura 9. CVTM.

**A.** Contexto geodinámico del CVTM y provincias ígneas de México (Ferrari *et al.*, 2012).

**B.** CVTM (gris) dividido en sus tres sectores, el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (MG) y principales provincias geológicas de México (Mazzarini *et al.*, 2010). Punto rojo representación de la ZGIH.

En consecuencia, este arco volcánico tiene una evolución heterogénea con diferentes características en cuanto a su posición, geometría y composición a través de tiempo. En 2012, Ferrari *et al.*, proponen que CVTM inició con una composición principalmente andesítica (~19 a 8 Ma), posteriormente presentó un vulcanismo máfico (~11 a 3 Ma), seguido de vulcanismo silíceo (~7.5 y 3 Ma) y desde el Plioceno tardío un vulcanismo con múltiples composiciones químicas. Dadas su características geoquímicas y estructurales el CVTM ha sido dividido en tres sectores, oriental, central y occidental (Pasquar *et al.*, 1987).

La zona de estudio está localizada entre los sectores central y occidental del CVTM y en el límite occidental del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG), restringido al oeste por los sedimentos del paleolago de Chapala (Fig. 9B). El CVMG se caracteriza por poseer principalmente conos de escoria, y otras geoformas volcánicas como domos, maars, anillos de toba, volcanes en semi-escudo y derrames de lava en menor proporción; (Hasenakal *et al.*, 1994). Por lo anterior el vulcanismo de la zona de estudio está asociado al CVMG, y el basamento local correspondería a las ignimbritas del Mioceno inferior asociadas a la Sierra Madre Occidental (SMO), es decir las unidades previas al CVTM (Fig. 10).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

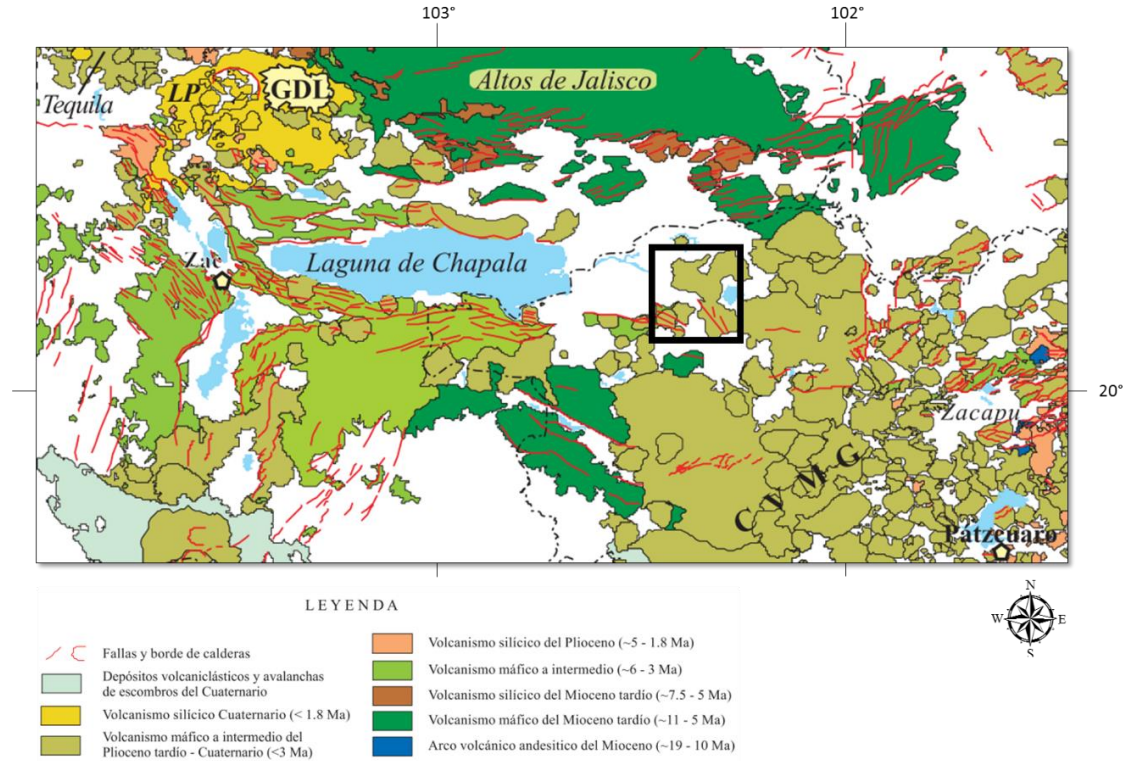


Figura 10. Evolución del CVTM por Gómez-Tuena *et al.*, (2005). El recuadro negro corresponde a la zona de estudio.

**Rift de Chapala**

Por otra parte, el vulcanismo del occidente del CVTM ha sido controlado por un sistema tectónico de tres *riffts* que se juntan en una intersección triple al SSO de Guadalajara, conformada por los grabenes de Tepic, Colima y Chapala; con orientaciones NO-SE, NS y EO respectivamente (Garduño-Monroy y Tibaldi, 1991) (Fig. 11A). Esta configuración separa al bloque Jalisco de la placa norteamericana, y se inició con movimientos laterales izquierdos en el Mioceno tardío, en consecuencia a los cambios en la tectónica de la trinchera mesoamericana y la apertura del golfo de California (Garduño-Monroy y Tibaldi, 1991). Este punto triple en la zona occidental de México puede ser resultado de la geometría y dinámica de la microplaca de Rivera (Stock, 1993).

Para Garduño-Monroy *et al.*, (1993) el *rift* de Chapala (EO) está compuesto por el aulacógeno Chapala y el graben de Cítala él cual podría considerarse como el *rift* producto de la tectónica actual. El *rift* inició en el Mioceno tardío con lineamientos EO con



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

movimientos laterales izquierdos y finalizó con movimientos normales desde el Plioceno tardío hasta el Pleistoceno (Fig. 11B) configurando un sistema de bloques que buzan hacia el Lago de Chapala; posteriormente y hasta la actualidad se desarrolló a través de fallas normales ONO-ESE en el sur del Lago que pueden considerarse activas dado que enmarcan el Graben de Cítala. Las unidades más antiguas de éste graben corresponden a brechas heterogéneas y andesitas de 12-8.8 Ma, cubiertas por sedimentos lacustres del Mioceno tardío al Plioceno temprano, para el Plioceno medio se inicia el vulcanismo efusivo característico de esta zona (Garduño-Monroy *et al.*, 1993). Según Urrutia-Fucugauchi y Rosas-Elguera, (1994) el *rift* presenta una rotación *sinistrórsus* resultado de la tectónica transtensiva izquierda que caracteriza al sistema de fallas Chapala-Tula, asociada a la subducción oblicua de la placa de Cocos bajo la trinchera mesoamericana.

Según los autores anteriormente mencionados, la ZGIH estaría entonces en el límite oriental del Graben de Cítala, inmersa en la actividad tectónica transtensiva que corresponde al patrón EO del sistema de fallas Chapala-Acambay (Fig. 11C) (Banwell y Gómez-Valle, 1970; Rosas-Elguera *et al.*, 1989) localmente con  $\sigma_{Hmáx} = N50$  y  $N70$  y con  $\sigma_{Hmín} = N140$  y  $N160$  (Pasquare *et al.*, 1990), que permanecen activas como lo demuestran los registros de actividad sísmica en el sector central del CVTM asociados al sistema de fallas Chapala-Tula del Servicio Geológico Mexicano.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

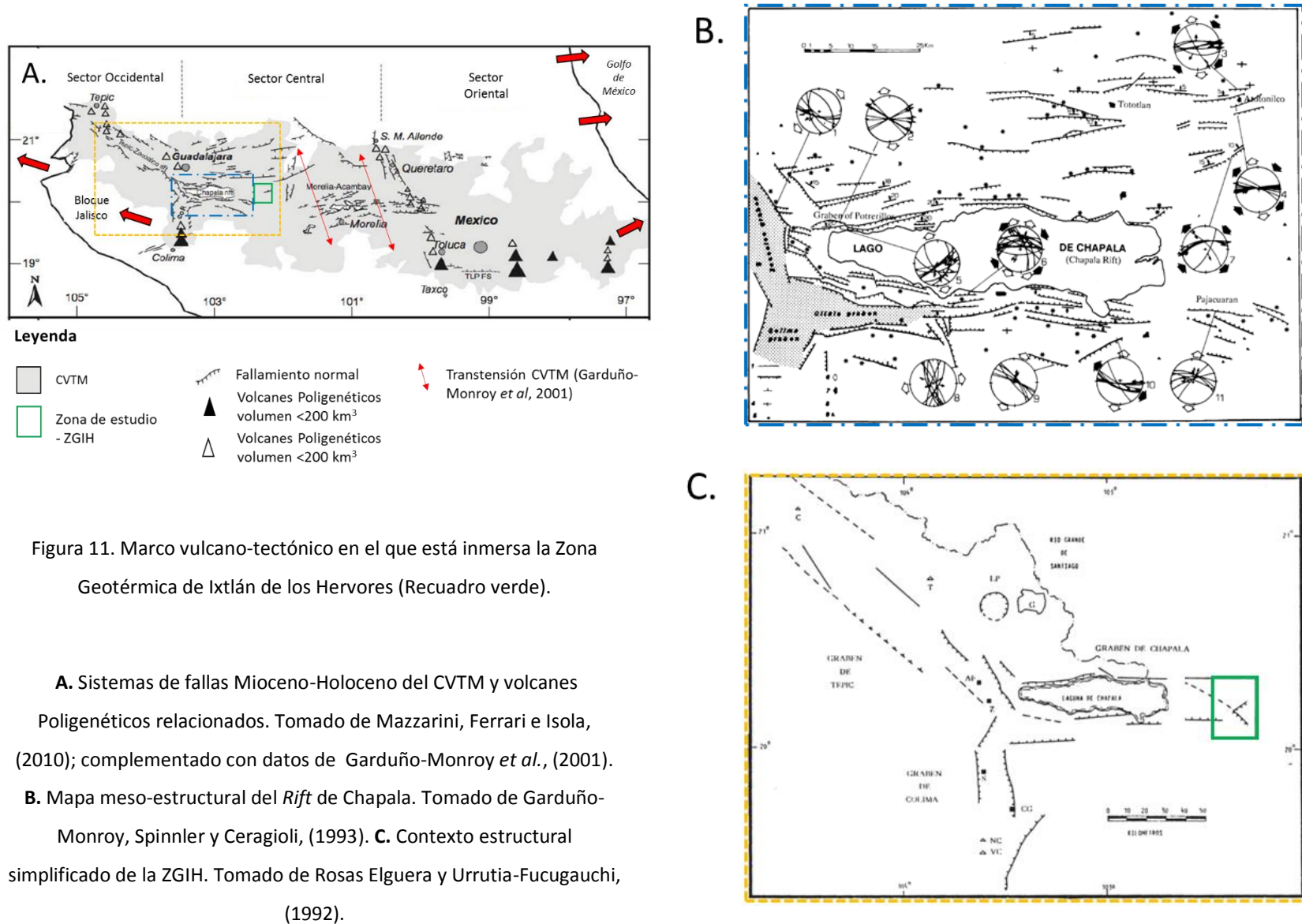


Figura 11. Marco vulcano-tectónico en el que está inmersa la Zona Geotérmica de Ixtlán de los Hervores (Recuadro verde).

- A.** Sistemas de fallas Mioceno-Holoceno del CVTM y volcanes Poligenéticos relacionados. Tomado de Mazzarini, Ferrari e Isola, (2010); complementado con datos de Garduño-Monroy *et al.*, (2001).
- B.** Mapa meso-estructural del Rift de Chapala. Tomado de Garduño-Monroy, Spinnler y Ceragioli, (1993).
- C.** Contexto estructural simplificado de la ZGIH. Tomado de Rosas Elguera y Urrutia-Fucugauchi, (1992).



### II.III Geología

Para inicios de 1968, la ZGIH fue estudiada a nivel geológico, geofísico y geoquímico por el Instituto de Investigación para la Industria Eléctrica parte de la CFE (Banwell y Gómez-Valle 1970); también fueron realizados estudios fotogeológicos a través de imágenes obtenidas por aviones NP3A el 9 y 11 de abril de 1969 de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) como parte de la Misión 91, cubriendo un área de 900 km<sup>2</sup>; la interpretación de dichas fotografías constató que las manifestaciones geotérmicas superficiales de la ZGIH corresponden a pequeños géiseres y *vents* de vapor alineados con una tendencia NO-SE mostrando una relación directa con la Falla Ixtlán (Gómez-Valle *et al.*, 1970).

Banwell y Gómez-Valle (1970), mencionan que dicha falla también representa un contacto entre derrames basálticos de edad cuaternaria y sedimentos lacustres y que a su vez controla un depósito de hasta 40 cm de geiserita (sinter); adicionalmente, comentan como desde tiempos prehispánicos los manantiales termales de la ZGIH han sido usados para cocinar, al señalar la presencia de remanentes de cerámica embebidos en los depósitos de sinter especialmente en el área de Ixtlán. Estos estudios iniciales también mencionan la existencia de la falla Limón (Nogales en este trabajo) como otra característica estructural prominente de la ZGIH y que configura junto con la falla Ixtlán un horst en la parte norte de la zona geotérmica (Del Castillo y Díaz-Pérez, 1970).

Del Castillo *et al.*, (1970), hacen énfasis en la complejidad tectónica de esta zona, dado que los sedimentos actuales posiblemente cubren otras estructuras en el valle de Ixtlán; sin embargo, enfatizan que la actividad volcánica ha sido propiciada precisamente por las fallas y que dichos derrames de lavas están intercalados con sedimentos lacustres de hasta 200m de espesor. Concluyendo que la actividad geotérmica está relacionada tanto a los fenómenos tectónicos como a los volcánicos de esta zona.

Rosas-Elguera (1987), menciona la importancia de los bajos estructurales o grabenes como estructuras geológicas óptimas para el establecimiento de un sistema geotérmico e identifica esta configuración estructural en Ixtlán. Rosas-Elguera *et al.*, (1989) señalan la relación de las ZGIH y Los Negritos con la evolución tectónica del occidente mexicano; especialmente con el punto triple



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

y su brazo E-O, es decir, el graben de Chapala. Para estos autores las fallas Ixtlán (NO-SE) y Pajacuarán (E-O) corresponden a los límites norte y sur del graben respectivamente y juega un papel fundamental en el ascenso de fluidos geotérmicos y su manifestación superficial.

Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi (1992), realizaron un estudio de magnetoestratigrafía volcánica y dataciones K-Ar indicando que la actividad volcánica al oriente del Lago de Chapala se desarrolló desde el Cron 8 (Mioceno superior, fechamiento K-Ar de  $8,8 \pm 0,8$  Ma) hasta el Cron Brunches (0-0.73 Ma) y que esta zona ha estado afectada por eventos tectónicos que originan un intenso fracturamiento, a través del cual se favoreció un vulcanismo basáltico y andesítico, de edades entre el Mioceno tardío al reciente. Asimismo, mencionan rocas sedimentarias (limolitas, arcillolitas y diatomitas) de origen lacustre asociadas a la antigua extensión del Lago de Chapala de edad Plioceno medio. La Fig. 12, corresponde al mapa geológico regional en el que está inmersa la ZGIH de Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, (2006).

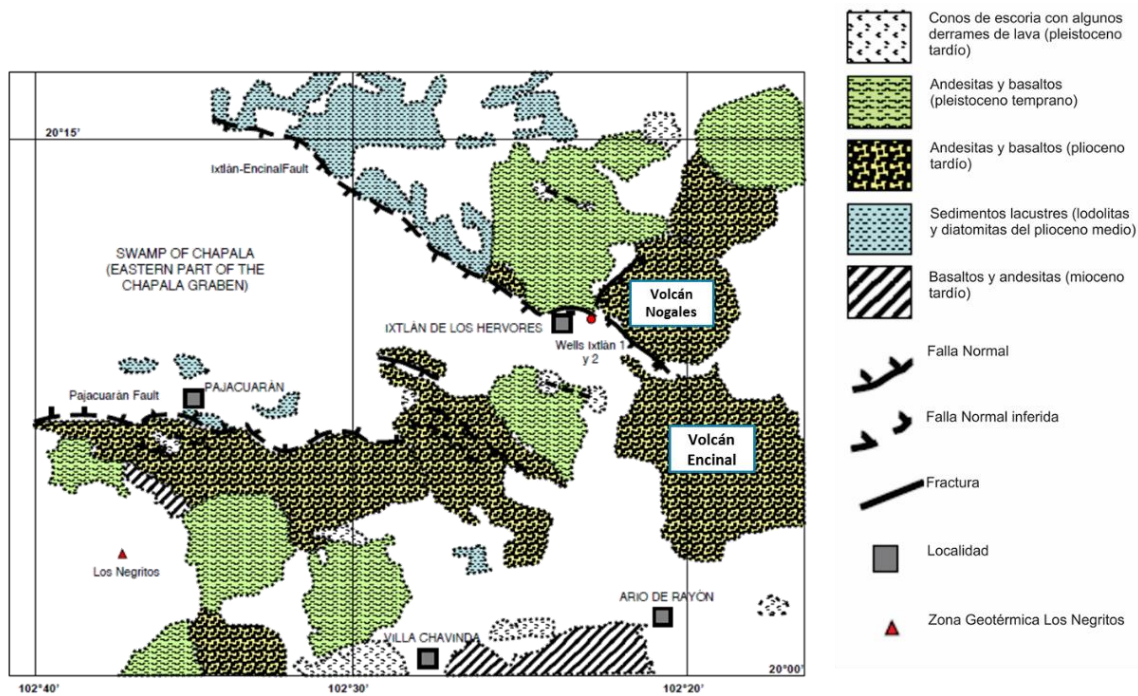


Figura 12. Mapa geológico regional según Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2006, la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores está simbolizada con el punto rojo.



Por su parte, Casarrubias (2000) reportó una erupción freática que ocurrió el 19 de mayo de 2000 en la zona de El Salitre, que arrojó agua y lodo a 10 metros de altura, formando una serie de cinco cráteres alineados con dirección NE-SO de hasta 3 metros de diámetro y 0.8 m de profundidad, donde permaneció agua y lodo a 90°C. Demostrando que estos eventos explosivos han estado en presentes en la evolución del sistema geotérmico de Ixtlán.

### **II.III.I Hidrología**

En el Valle de Ixtlán la presencia de antiguo material volcánico crea las condiciones geohidrológicas óptimas para mantener dos niveles freáticos separados que consisten en la recarga de esta zona. El más superficial (1.2m) es alimentado por las aguas superficiales del Río Duero, mientras el más profundo, corresponde a un acuífero resultante de la configuración estructural tipo graben que permite una recarga en dirección NO-SE que tiene un contacto directo con una posible fuente de calor a profundidad. La diferencia de niveles hidrostáticos es sugerida dada la formación de géiseres y manantiales termales con períodos de quietud y actividad con un una duración periódica pero variable con las estaciones del año (Banwell y Gómez- Valle 1970).

### **II.IV Geoquímica de agua y gases**

Teniendo en cuenta los datos consignados en los trabajos realizados por Banwell y Gómez-Valle (1970) (Anexo 1) y Tello-Hinojosa (1986) (Anexo 2) sobre las características químicas e isotópicas del agua de los manantiales de la ZGIH; se generaron diagramas de clasificación (Fig. 13 y 14) en la hoja de cálculo de Powell y Cumming, (2010). Dichos diagramas apoyan las interpretaciones de estos autores sobre el origen del agua de la ZGIH y su temperatura en el reservorio a través del cálculo de geotermómetros de solutos. La composición química del agua de los manantiales de Ixtlán de los Hervores es de tipo clorurada-sódica con una sutil tendencia hacia los sulfatos (Fig. 13), a excepción de las aguas del pozo de agua potable (P25) y la Noria (N31) que son de tipo sódico-bicarbonatado sugiriendo que provienen de aguas subterráneas que someramente interactúan con las rocas circundantes a bajas temperaturas (Anexo 2) (Tello-Hinojosa, 1986). Adicionalmente, la composición isotópica sugiere que sus aguas son una mezcla de aguas meteóricas y geotérmicas (Fig. 14).



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

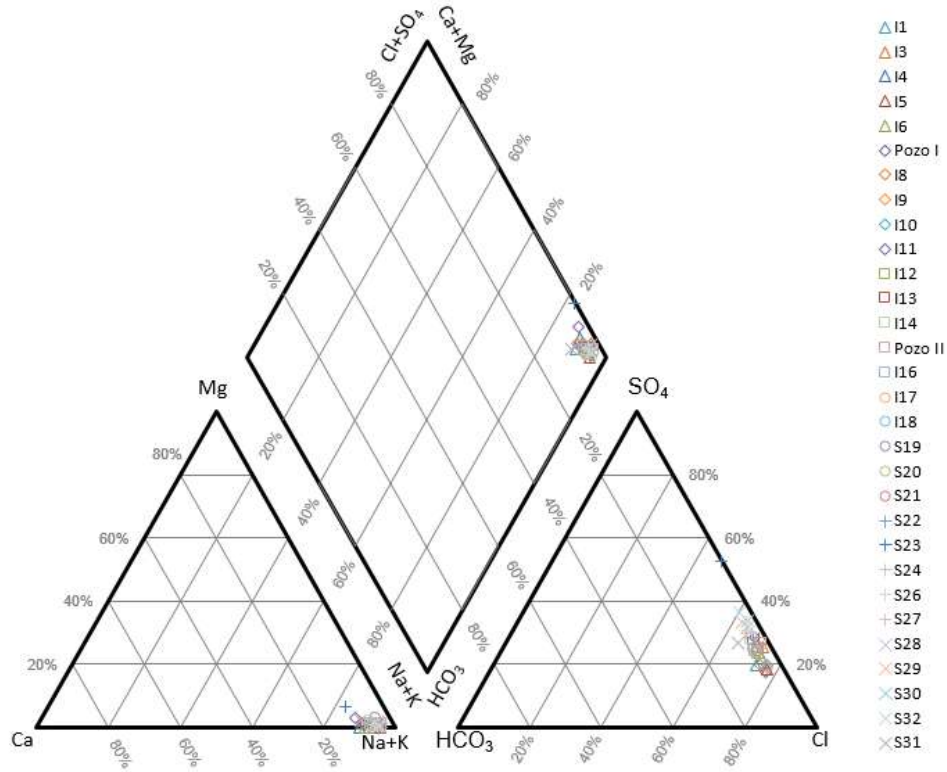


Figura 13. Diagrama de Piper con los datos del Anexo, 1. Nótese que la composición química del agua geotérmica de la zona de estudio es principalmente clorurada-sódica con tendencia hacia los sulfatos.

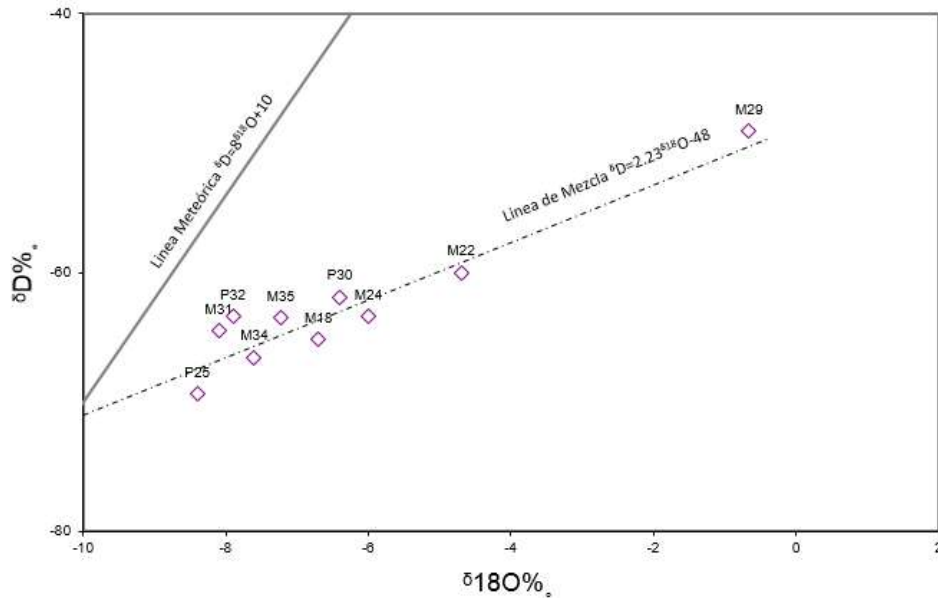


Figura 14. Composición Isotópica de manantiales termales de Ixtlán de los Hervores (Tello, 1986) con tendencia a la línea de mezcla.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Las aguas geotérmicas cercanas a la zona de Ixtlán muestran una distribución uniforme del Cl y B, así como de  $\text{HCO}_3$  y  $\text{SO}_4$ , en contraste, El Salitre tiene mayor variabilidad, lo que sugiere que el reservorio puede estar albergado en rocas diferentes de andesitas o basaltos (Banwell y Gómez-Valle, 1970). Los geotermómetros de potasio-sodio (K-Na) y sodio-potasio-calcio (Na-K-Ca) indican temperaturas a profundidad que varían de 169-220°C y 153-198°C respectivamente; mientras el geotermómetro de la sílice aplicando el modelo de expansión adiabática con máxima pérdida de vapor indican temperaturas máximas de 208°C. Dichas condiciones son favorables para la existencia de un reservorio hipertermal a profundidad (Tello-Hinojosa, 1986).

Por su parte, análisis químicos de gases emitidos por los manantiales termales, muestran en general un alto contenido de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  y gases inertes, y pocas concentraciones de  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2$ ; el origen de estos constituyentes podría estar asociado a magmas profundos (Banwell y Gómez-Valle, 1970). Polak *et al.*, (1982, 1985) realizaron estudios de la composición isotópica y la concentración de gases de la ZGIH consignados en la Tabla 1., que sugieren una ligera componente manto/magmática en el sistema geotérmico de Ixtlán especialmente marcado por la relación  $^3\text{He}/^4\text{He}$ . Asimismo, Tello-Hinojosa (1986) concluye que la composición química de los gases del ZGIH es de un sistema geotérmico de alta temperatura.

Gas	[ 10 <sup>4</sup> ppm]	Relación Isotópica	Valor
O <sub>2</sub>	3.6	( <sup>3</sup> He/ <sup>4</sup> He) x 10 <sup>-6</sup>	5.6
Ne <sub>2</sub>	33.1	<sup>21</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	2.93
CO <sub>2</sub> +CO+H <sub>2</sub> S+SO <sub>2</sub>	59.8	<sup>20</sup> Ne/ <sup>22</sup> Ne	10.15
CH <sub>4</sub>	3.4	<sup>40</sup> Ar/ <sup>36</sup> Ar	301
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.023	<sup>36</sup> Ar/ <sup>38</sup> Ar	5.35±0.06
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.015	q <sup>40</sup> Ar	1.8
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.008	q <sup>38</sup> Ar	0.0

Tabla 1. Composición isotópica y concentración (10<sup>4</sup> ppm) de gases de la ZGIH. Tomado de Polak *et al.*, (1982, 1985).



## II.V Geofísica

Uno de los primeros estudios geofísicos ejecutados en la ZGIH fue realizado por CFE, quienes obtuvieron un mapa de isoresistividades (Fig. 15) a través del dispositivo Wenner (4 electrodos igualmente espaciados de forma lineal). Dicho mapa permitió interpretar una estrecha zona de alteración hidrotermal (3.5 km) relacionada espacialmente a una baja resistividad ( $<5 \Omega/m$ ) que se extiende sobre los sedimentos lacustres entre los poblados de Ixtlán y El Salitre y con tendencia NO-SE. Asimismo, este bajo resistivo fue relacionado con la capa sello formada por los procesos de alteración hidrotermal y con la zona de ascenso de fluidos coherente con el trazo de la Falla Ixtlán (Gómez-Valle *et al.*, 1970; Hickel y Pecora 1970; Banwell y Gómez-Valle *et al.*, 1970). Por su parte Urbietta-Gómez en 2010 confirma la existencia de ésta anomalía de baja resistividad asociada a la Falla Ixtlán y al alto flujo de calor.

Además, Banwell y Gómez-Valle (1970) mencionan que la dirección NON-SES que también toma la anomalía, sugiere un sistema menor de fallas y fracturas que hace parte del valle estructural de Ixtlán y que separaría a las manifestaciones de Ixtlán y El Salitre; esto inferido dadas las diferencias en la química de aguas de estas dos localidades; sin embargo, menciona que esta evidencia no es concluyente para plantear dos fuentes termales (acuíferos) pudiendo ser dichas diferencias dadas a movimientos en las fallas e incluso a diferencias en la roca reservorio a nivel local.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

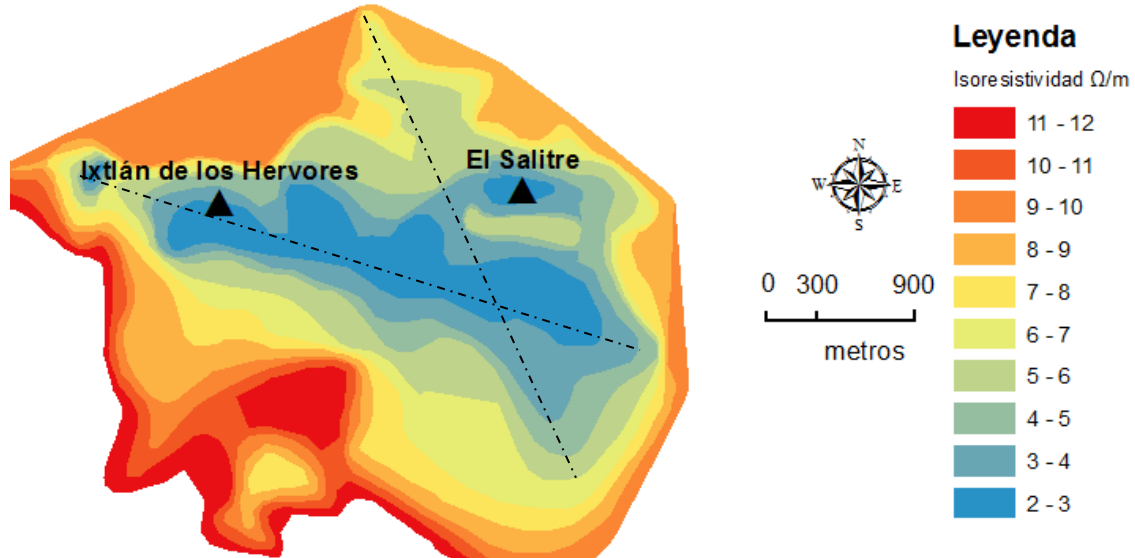


Figura 15. Estudios de resistividad llevados a cabo por CFE en Banwell y Gómez (1970), re-interpolados cada  $1\Omega/m$  en este trabajo. Las líneas punteadas muestran las tendencias NO-SE y NON-SES de la anomalía de baja resistividad que presenta concordancia con la Falla Ixtlán y la distribución de manifestaciones termales superficiales.

Entre 1967 y 1969 la CFE y la UNAM realizaron estudios de sismología de refracción (Del Castillo y Díaz-Pérez, 1970) y levantamientos magnéticos y gravimétricos (Del Castillo *et al.*, 1970) en la ZGIH. El levantamiento por sismología de refracción (líneas N-S y E-O) fue realizado para ampliar la información de la geología del subsuelo; las secciones de refracción muestran cuatro capas con velocidades de 1200, 1700, 2600-3000 y 4400 m/s. Las velocidades de 1700 y 4400 m/s tienen significancia estructural y permiten plantear la existencia de un graben de 4 km de ancho con orientación NS en el valle entre Ixtlán y San Simón-La Estanzuela. Plantean también que la secuencia del valle del Ixtlán iniciando por la base correspondería a basaltos (velocidades más altas), alternancia de lavas basálticas y sedimentos lacustres y/o aluviales y finalmente a material volcánico y/o sedimentos lacustres no consolidados y fracturados. Los datos magnéticos y gravimétricos muestran que la ZGIH descansa sobre bloques a diferentes profundidades, e infirieron una gran complejidad tectónica en la zona.

Ortíz-Prieto (2007), realizó un mapa de anomalía de Bouguer que muestra de manera regional una anomalía positiva gravimétrica NE-SO que se limita al SO con una tendencia



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

general NO-SE relacionadas a las fallas Nogales e Ixtlán respectivamente; los perfiles proponen en general a un valle de Ixtlán con múltiples bloques y con una anomalía positiva menor en el valle (Fig. 16).

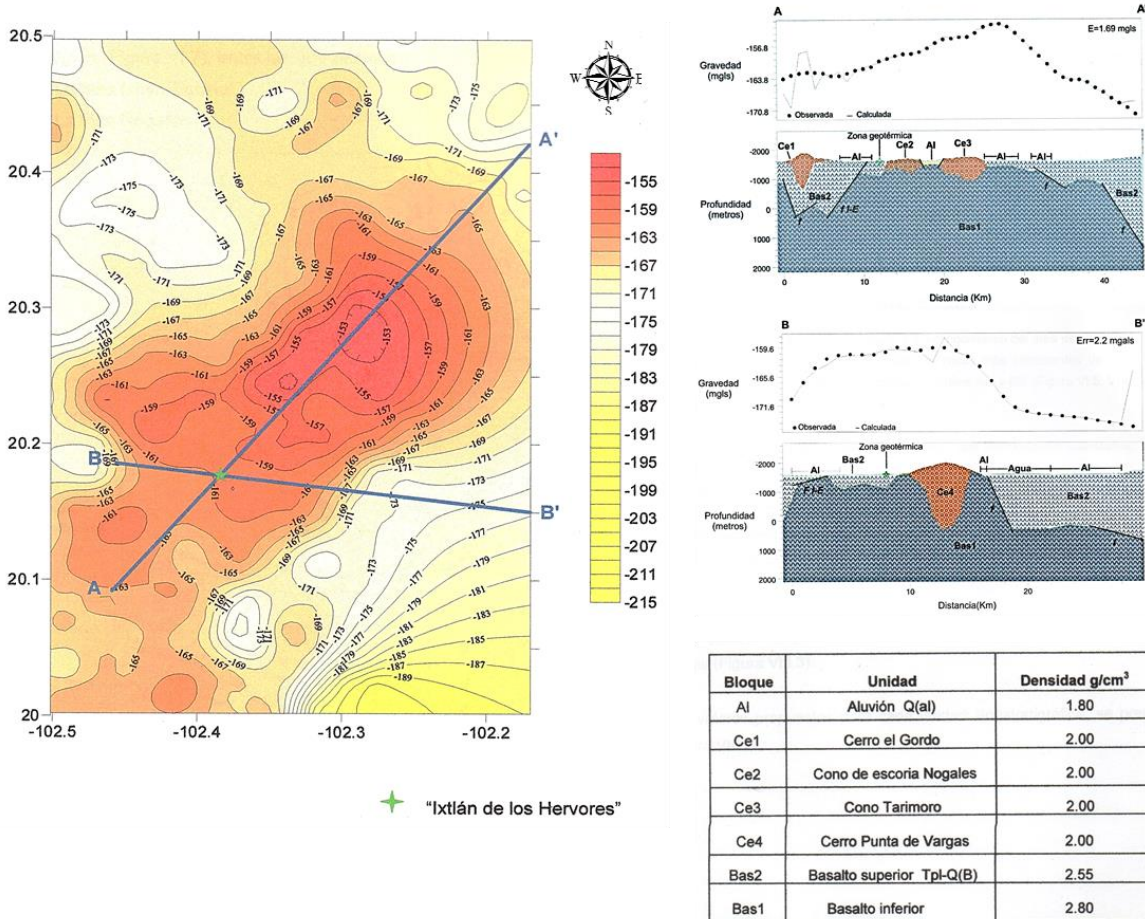


Figura 16. Anomalía de Bouguer completa (contornos cada 2 mGal) y perfiles gravimétricos. La ZGIH es simbolizada con la estrella verde. Tomado de Ortiz Prieto, (2007).

De manera más regional, Alatorre-Zamora *et al.*, (2015), con el fin de establecer la estructura interna del Graben de Chapala, desarrollaron un estudio magnético; de cinco perfiles ~N-S a lo largo del eje E-O del lago de Chapala. Las anomalías magnéticas están asociadas tanto al relleno sedimentario, como a bloques someros inclinados de composición basáltica y andesítica y a flujos de lavas basálticas expuestas en las islas volcánicas del lago. La modelación magnética indicó la presencia de un horst que separa



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

dos bajos estructurales y en general estas características defienden una profunda extensión en el Graben de Chapala.

Por su parte el SGM en 1988 elaboró la carta del campo magnético total Pajacuarán (CT\_F13-D88\_GF) en donde está inmersa la ZGIH (Fig. 17); en esta los colores rojos indican anomalías positivas (hasta +500 nT) mientras los colores azules indican anomalías negativas (hasta -900 nT del valor teórico). Las anomalías registradas son bastante intensas, ya que entre los valores altos (rojos) y los bajos (azul) hay una diferencia de intensidad en la anomalía de más de 1300 nT. En el lado suroeste de Ixtlán los altos valores de la anomalía están principalmente relacionados con estructuras volcánicas en superficie, mientras que bajo los sedimentos lacustres no hay grandes valores de anomalía. La carta hace notar las características del campo magnético regional, relacionado a estructuras volcánicas y con estructuras que pueden ser correlacionadas con las observadas mediante criterios morfológicos.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

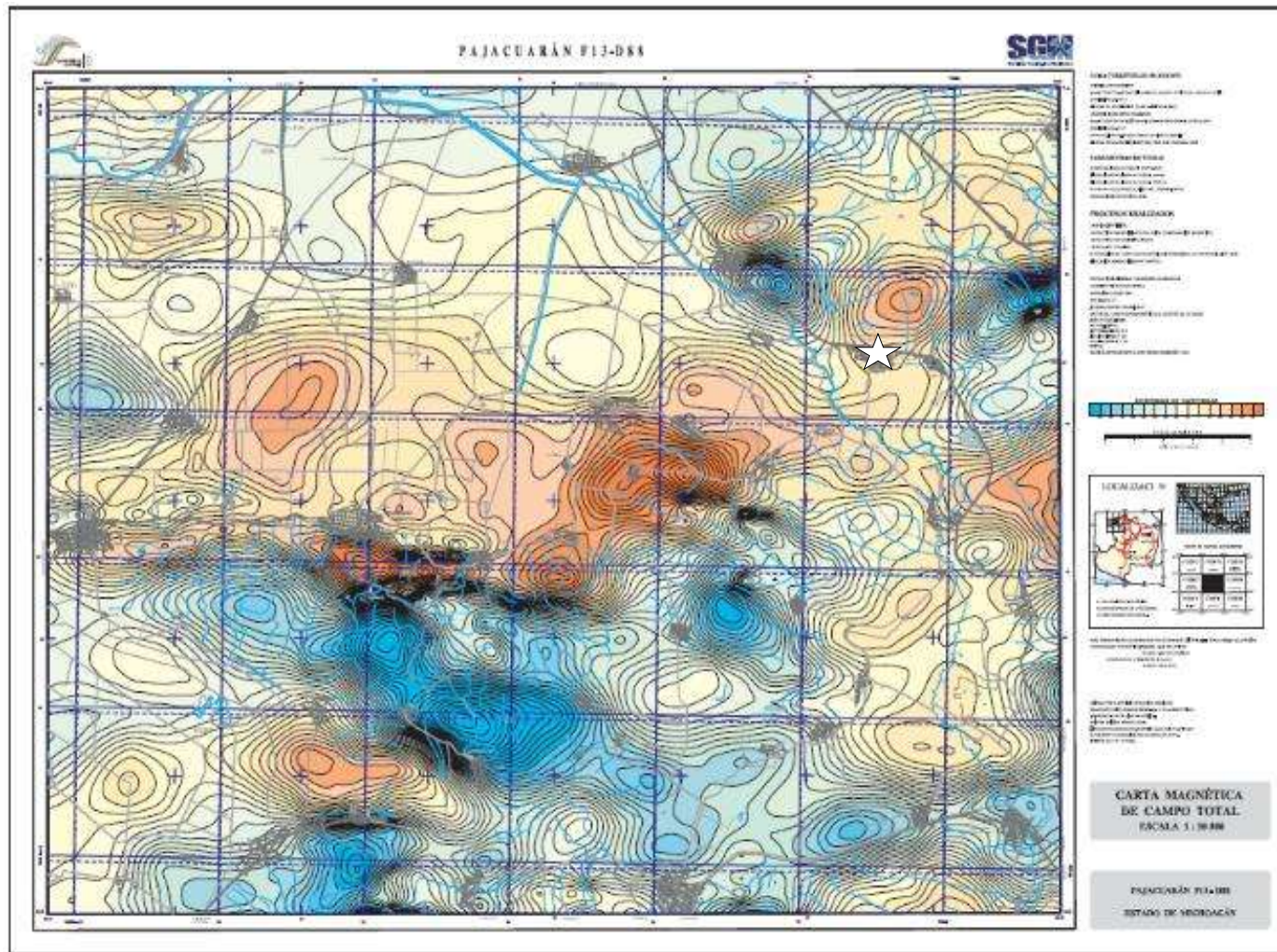


Figura 17. Mapa aeromagnético del área obtenido por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en 1998. Carta Magnética de Pajacuacán (CT\_F13-D88\_GF). Colores rojos indican anomalías positivas (hasta +500 nT) mientras los colores azules indican anomalías negativas (hasta -900 nT del valor teórico). El poblado de Ixtlán de los Hervores está indicado con una estrella blanca.



## II.VI Información de perforaciones

A pesar de la poca información litológica disponible de las perforaciones que fueron realizadas en la ZGIH entre 1956 y 1970 se rescata la información registrada por Banwell y Gómez (1970); estos autores mencionan que en la ZGIH fueron realizadas 8 perforaciones, que arrojaron la siguiente información:

- El depósito de sedimentos lacustres en el valle de Ixtlán es del orden de 120 metros y le subyacen basaltos.
- Los flujos de lava de la zona norte presentan espesores entre los 80-130 metros subyaciendo sedimentos lacustres y estos finalmente subyaciendo lavas aún más antiguas.
- En contraste los basaltos del SO tienen espesores entre 200-300 metros, y se alternan con sedimentos lacustres.
- La capa de baja resistividad y de mayor temperatura ocurre entre 90 y 160 metros a profundidad y solamente se ubicó en el sondeo I-7 hasta 180 metros (SE de El Salitre).
- En un sondeo al sur de El Salitre y dentro del contorno de  $3 \Omega/m$  encontraron dos niveles termales, uno a 120 metros de profundidad midiendo  $90^{\circ}C$  con marcada tendencia a incrementar a profundidad y el segundo a 577 metros con una temperatura de  $140^{\circ}C$ ; identificaron perdidas de circulación. De este sondeo recuperando un núcleo de 30 cm clasificado como una brecha basáltica muy alterada de color verde y con venas de cuarzo.

También menciona un programa para la perforación de 5 nuevos pozos exploratorios sin encontrarse información de su realización por parte de esta investigación; sin embargo, esta información puede estar resguardada por CFE.

Por su parte Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín (2006, 2007) realizaron un estudio petrográfico con énfasis en la alteración hidrotermal a partir de las muestras del Pozo N°3 (realizado entre 2004-2005); definiendo una columna litológica (Fig. 18) describiendo que entre los 78 y 159 metros de profundidad se encuentra la zona de facies zeolitas



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

caracterizada por la asociación laumontita+cuarzo+calcita+clorita/esméctita+pirita; esta paragénesis mineral para estos autores sugiere temperaturas entre 125 y 225°C bajo la cual podría encontrarse la facies epidota-wairakita de mayor temperatura e indicativa del reservorio geotérmico.

Teniendo en cuenta sus resultados y la información disponible de la exploración geotérmica superficial de la ZGIH, Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín (2007) propusieron un modelo conceptual preliminar del yacimiento de Ixtlán (Fig. 19), mencionan que el yacimiento tiene fluidos de tipo clorurado-sódico, con pH neutro, con sobresaturación de sílice en la descarga y con temperatura entre 125 y 225°C, al tener en cuenta la asociación hidrotermal y el cálculo de temperaturas a través de geotermómetros en el pozo N°3.

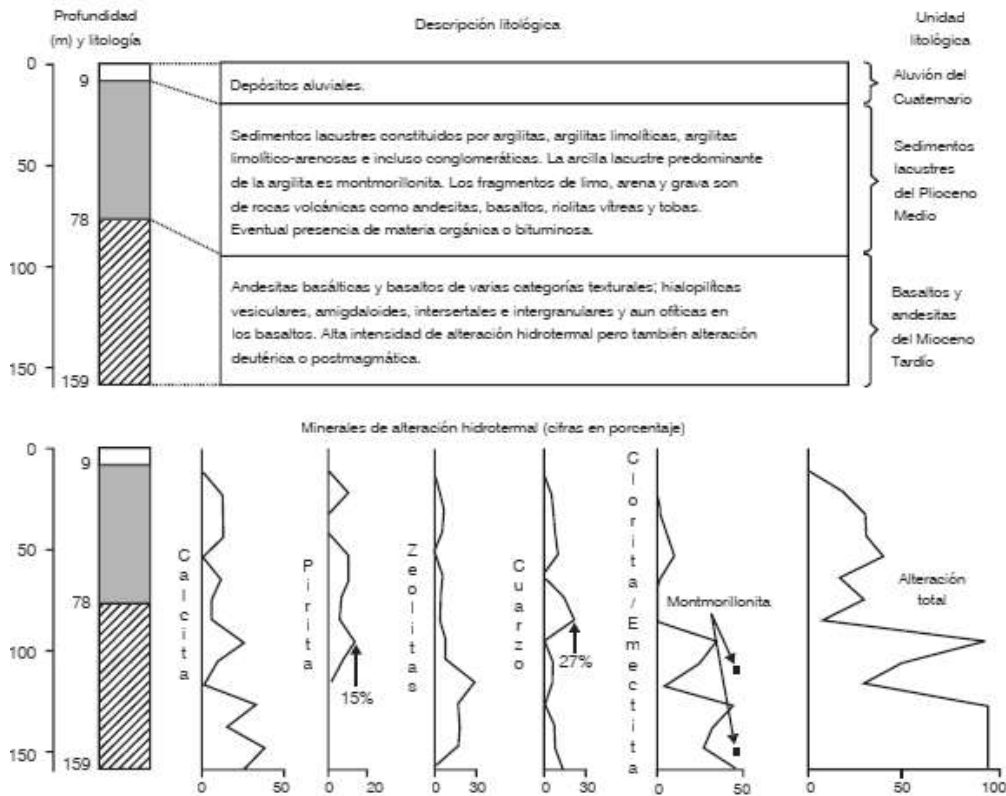


Figura 18. Columna litológica establecida a través del estudio de los rípos de la perforación N°3 (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

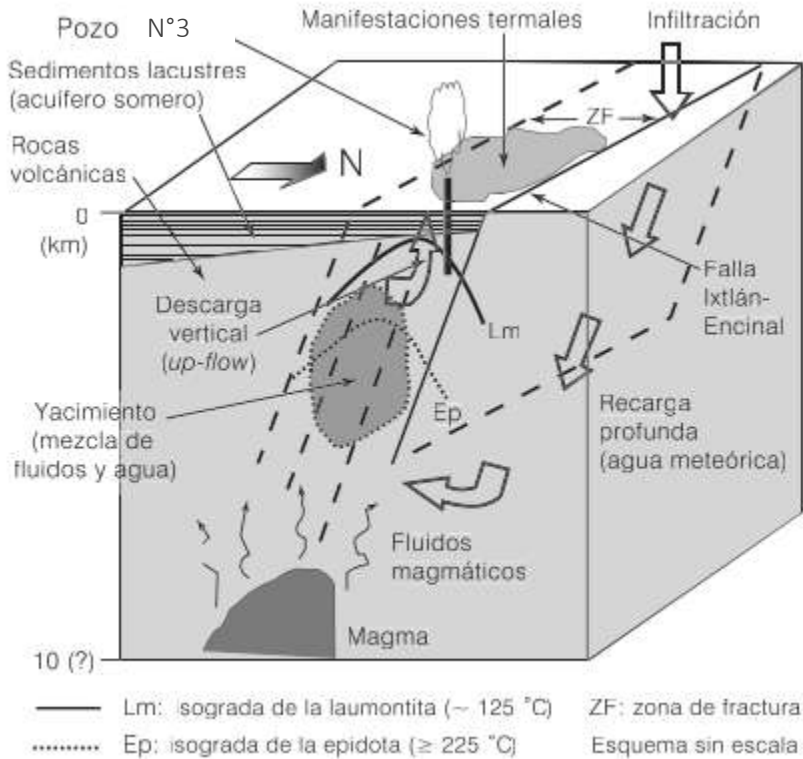


Figura 19. Modelo esquemático del probable sistema geotérmico de Ixtlán de los Hervores (Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín, 2007)

### II.VII Potencial geotérmico

Banwell y Gómez-Valle (1970) realizaron mapa de isotermas de la ZGIH registrando los datos de temperaturas tomados a un metro de profundidad en un área de 3 km<sup>2</sup>; estos autores lograron calcular una conductividad térmica media de  $2 \times 10^{-3}$  cal/cm sec °C para los sedimentos lacustres. De acuerdo a estos autores, debido a que el espesor de los sedimentos en el área es de 150-200 metros, la máxima temperatura del reservorio es 150°C y el contorno de los 5 Ω/m es de 2.3 km<sup>2</sup> concluyeron que el potencial geotérmico para el reservorio superior es muy pequeño; al asumir que el 25% de la energía es posible transfórmala en energía eléctrica el potencial podría ser de 150 MW año, lo que quiere decir 10 MW por 15 años. Y si se asume que el área de 10 Ω/m es productiva, el potencial aumenta a 420 MW año, pero solo podría abastecer una pequeña planta por un número muy limitado de años. La explotación de este reservorio es más favorable para suplir de energía una parte de una industria según Banwell y Gómez Valle, (1970).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

En contraste Hiriart *et al.*, (2011) teniendo en cuenta las características de la Tabla 2. calcularon un potencial de 17 MW para la ZGIH, con una desviación estándar de 7 MW y el intervalo de confianza al 90% entre 0 y 23 MWe a través del Método Volumétrico-Montecarlo y con el método de descompresión gradual calcularon un potencial de 15 MW.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor Mínimo</b>	<b>Valor esperado</b>	<b>Valor Máximo</b>
Vida del proyecto (años)	25	30	35
Presión sep. (Bar)	5	9	12
Área (km <sup>2</sup> )	1	2.5	4
Espesor (km) 0.8		1.5	2.1
Temperatura del yacimiento (°C)	170	220	250
Temperatura ambiente (°C)	4	18	31
Humedad relativa (%)	47%	63%	90%
Porosidad de rocas del yacimiento (%)	5%	13%	20%
Densidad de rocas del yacimiento (kg/m <sup>3</sup> )	2200	2600	2800
Calor específico (cal/g°C) (kJ/kg°C)	0.79	0.82	1.1
Factor de recuperación Rg (%)	5%	10%	20%
Permeabilidad absoluta de rocas del yacimiento (mildarcy, mD)	0.1	2	2.2

Tabla 2. Parámetros utilizados para la modelación del potencial geotérmico de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores (Hiriart *et al.*, 2011)

Hiriart *et al.*, (2011) tuvieron en cuenta la extensión de la zona de manifestaciones termales como las anomalías resistivas del área y los espesores probables del yacimiento que fueron estimados con base en las secciones electro-estratigráficas construidas a partir de los datos de los sondeos eléctricos verticales realizados en la zona por IIE-CFE. En cuanto a la recarga no se prevén problemas dado que en esta zona hay un acuífero somero contenido en los sedimentos lacustres que a través de fallas y fracturas podría recargar al yacimiento asociado probablemente a un acuífero regional profundo. La permeabilidad de las rocas a profundidad se estima entre media y alta (Ver Tabla 2) (Hiriart *et al.*, 2011).

A pesar de los estudios realizados por los autores mencionados, es evidente que esta información es escasa a nivel geológico y geofísico, y no sugieren nada respecto a los pasos a seguir dentro de la exploración de esta zona geotérmica, ni mucho menos de dónde perforar, ni cómo explotarla.



### Capítulo III. Marco teórico

Los proyectos geotérmicos son de alto riesgo financiero, no obstante, este riesgo es potencialmente reducido a través de una correcta exploración geológica y geofísica previa a la etapa de perforación y desarrollo, razón por la cual la selección correcta de las técnicas exploratorias a emplear es crucial (IGA, 2010). Una selección apropiada de la metodología de exploración está directamente relacionada al tipo de *play* geotérmico, es decir, a un modelo genérico que describe el ambiente geológico en el cual se puede hospedar un objetivo económico en geotermia (Moeck *et al.*, 2015).

#### III.1 *Play* geotérmico

Moeck, (2014), establece un catálogo de *plays* geotérmicos teniendo en cuenta sus características geológicas y sugiere diferentes técnicas para su exploración. Los *plays* geotérmicos se subdividen en dos grandes grupos dependientes del tipo de transferencia de calor (convección o conducción dominante) y según el tipo de control geológico (Ver Tabla 3). Esta clasificación es útil en términos de elegir las mejores técnicas exploratorias que permitirán establecer a futuro sitios de perforación exitosos, así como estrategias tecnológicas específicas para el mejor aprovechamiento del recurso.

De igual importancia es la identificación de los elementos principales de un sistema geotérmico, entre estos destacan:

1. Una fuente generadora de calor, que en ocasiones es asociada a una cámara magmática somera en enfriamiento, o bien al calor geotérmico.
2. Una capa conductora de calor impermeable que evite el contacto directo con la fuente de calor, esta capa puede ser producto de la intensa alteración hidrotermal.
3. Un acuífero almacenado en una roca reservorio caracterizada por su permeabilidad abundante y uniforme, que puede ser vapor o líquido dominante.
4. Una capa sello, de baja permeabilidad y sobre todas la anteriores.
5. Recarga, importante para que el reservorio persista en el tiempo y que debe ser correctamente evaluada y compensada en el momento de la explotación para no extinguir el yacimiento.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

6. Un complejo de fracturas y fallas que permitan el proceso tanto de recarga como el mismo ascenso de los fluidos hidrotermales (Rosas-Elguera, 1987).

Transferencia de Calor	Control Geológico	Sistema Geológico y contexto tectónico	Tipo de <i>play</i> Geotérmico	Código	Yacimiento tipo
<b>Convección dominante (CV)</b>	Cámaras magmáticas en campos volcánicos activos o recientes	Regiones de arcos volcánicos en zonas de subducción	<b>Volcánico</b>	<b>CV1</b>	Java-Kamojang (Indonesia) Taupo (Nueva Zelanda)
	Intrusivos magmáticos en cristalización	Dorsales mesoceánicas (MOR), Plumas mantélicas ( <i>Hot spots</i> ), Vulcanismo reciente en terrenos acresionados en cinturones orogénicos jóvenes, Complejos metamórficos, Cuencas <i>Pull-apart</i> , Cuencas antearco, <i>Rift</i> intracontinentales (graben) y Cuencas intracontinentales.	<b>Plutónico</b>	<b>CV2</b>	Larderello (Italia) <i>The Geysers</i> (USA)
	Fallamiento activo (sismicidad natural)		<b>Dominio Extensional</b>	<b>CV3</b>	<i>Basin and Range</i>
<b>Conducción dominante (CD)</b>	Litofacies (tamaño de grano y mineralogía) Biofacies (contenido fosilífero) + fallas y fracturas	Cuencas en márgenes pasivos, Cinturón de pliegues y cabalgamientos, Cuencas antepaís e intrusiones intracontinentales en terrenos planos	<b>Cuenca intracratónica (hidrotermal)</b>	<b>CD1</b>	Cuenca norte alemana
			<b>Orogéno (hidrotermal)</b>	<b>CD2</b>	Cuenca Molasse (Alemania)
			<b>Basamento (Roca seca caliente-petrotermal)</b>	<b>CD3</b>	Cuenca Cooper (Australia)

Tabla 3. Catálogo de *Plays* Geotérmicos, resumen basado en Moeck, (2014).

### III.I.II Contexto tectónico y *play* geotérmico

Un error frecuente en interpretaciones geológicas de áreas locales es el aislarlas de su marcos tectónicos y geológicos regionales e ignorar la influencia que este contexto tiene sobre las características particulares de una zona a estudiar. Para el caso de la geotermia, la comprensión del régimen tectónico en el que está inmerso el sistema geotérmico es



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

fundamental, no sólo porque tradicionalmente los yacimientos geotérmicos han sido asociados a zonas tectónicamente activas y con vulcanismo reciente (ej. Rosas-Elguera, 1987) sino, porque su contexto tectónico está relacionado al régimen térmico, el flujo de calor, la dinámica hidrogeológica, la química de fluidos, las fallas y fracturas, el campo de esfuerzos y la estratigrafía (Moeck, 2014). La Fig. 20 muestra la íntima relación entre el contexto tectónico y el tipo de *play* geotérmico o dicho de otra manera la trinidad entre la tectónica, el ambiente geológico y el sistema geotérmico.

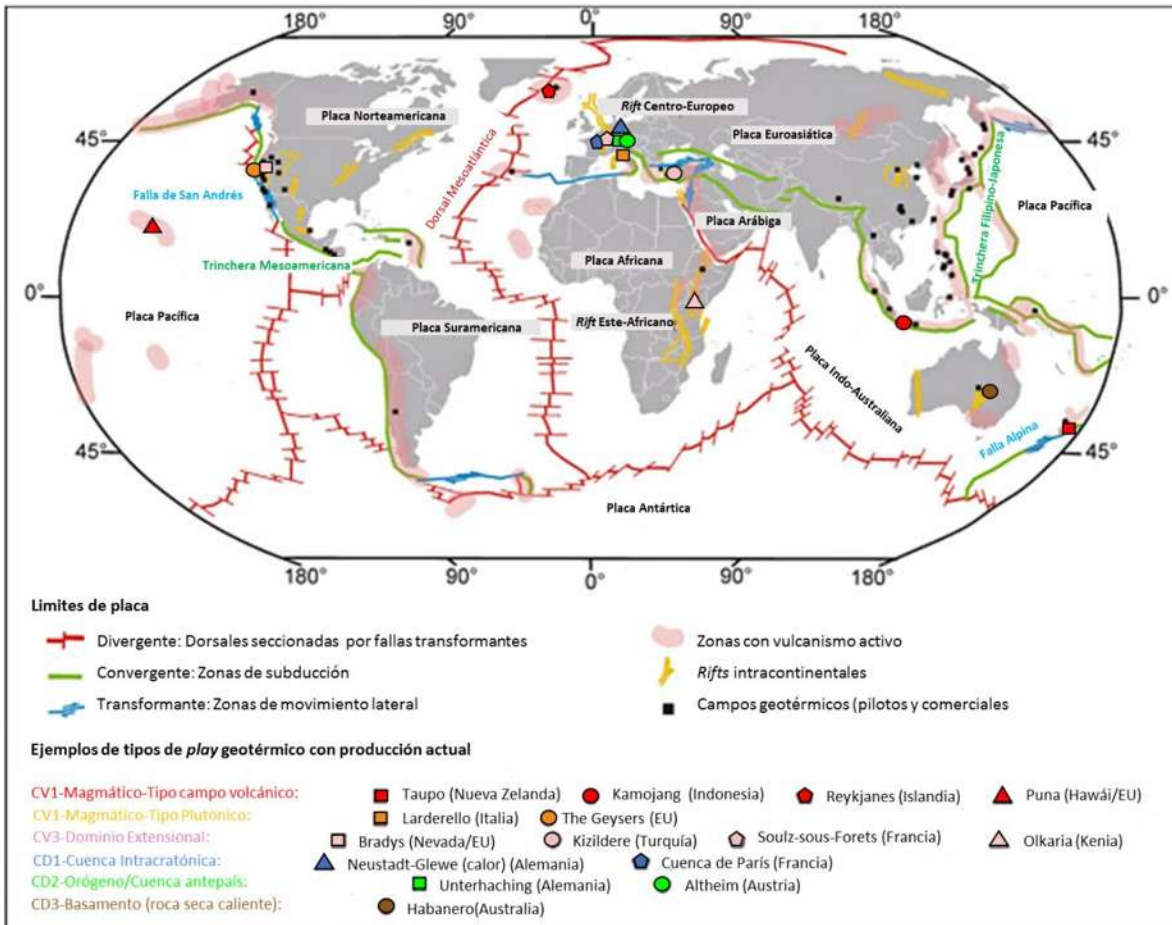


Figura 20. Contexto tectónico de los principales campos geotérmicos mundiales y relación con el *play* geotérmico (Moeck, 2014). Según el tipo de transferencia de calor, CV – Convección dominante, CD – Conducción dominante.

### **III.I.III Modelos Conceptuales**

Los modelos conceptuales son usados para ilustrar las principales características geológicas, geofísicas y geoquímicas de un yacimiento geotérmico; asimismo, proveen información de temperatura, presión y flujo de fluidos, dentro y fuera del sistema. Su elaboración requiere conjugar múltiples aspectos que tradicionalmente se exponen en secciones 2D (Cumming, 2009). Un modelo conceptual (Fig. 21) evidentemente se compondrá de la información disponible del yacimiento geotérmico, por lo tanto, no es un modelo estático, es decir se complementa con nuevos datos como los aportados a través de perforaciones exploratorias (Mortensen y Axelsson, 2013).

Para el desarrollo de un modelo conceptual (según su disponibilidad) se requiere de forma resumida la siguiente información:

- Información geológica y estructural, preferencialmente expuesta en cartografía geológica. Con énfasis en información de fracturas, fallas y el ambiente tectónico del área a estudiar.
- Información de perforaciones, incluyendo su localización y estratigrafía e información de pérdidas de circulación.
- Información de porosidad, alteración hidrotermal e isothermas.
- Información geofísica como la provista por estudios gravimétricos, magnetométricos y de resistividad, y sus correspondientes interpretaciones geológico-geofísicas.
- Información sísmica regional, local y de sismicidad teniendo en cuenta microsismos y sus interpretaciones geológico-geofísicas.
- Condiciones de temperatura y presión del sistema geotérmico a partir de información de pozos. También modelos térmicos y barométricos.
- Composición química y contenidos de gases de los fluidos geotérmicos (Mortensen y Axelsson, 2013).

En las primeras fases exploratorias un modelo conceptual representa una ventaja dado que permite poner a prueba las inferencias del modelo a través de su mejoramiento (Cumming, 2009) e incrementando el éxito de las perforaciones futuras dado que se ubicarán con mayor precisión los pozos.



# MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

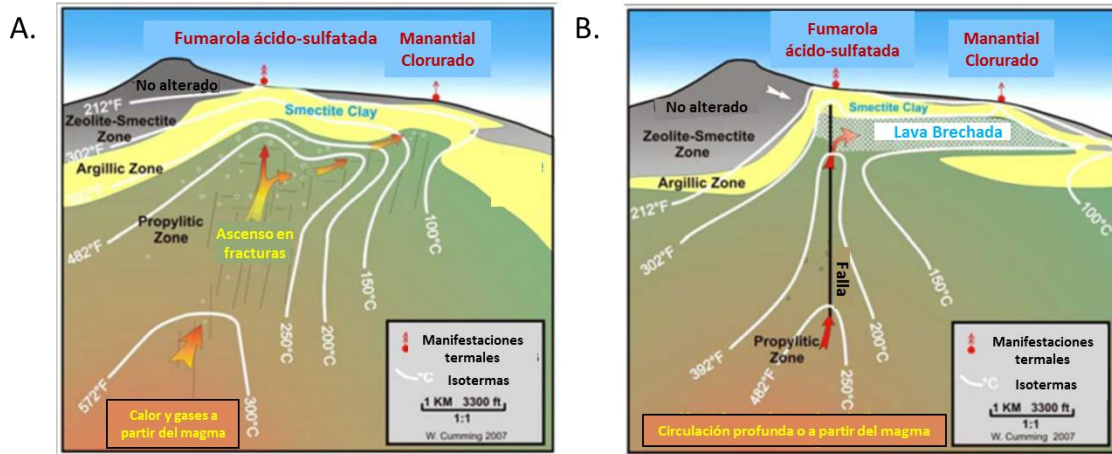


Figura 21. Modelos conceptuales de reservorios geotérmicos a 250-300°C (A.) y 150-200°C (B.), con estructuras, zonas de alteración hidrotermal e isothermas (Cumming, 2009).

## III.II Técnicas exploratorias en geotermia

### III.II.I Sensores remotos

Desde el punto de vista geológico la fointerpretación (ej. *SPOT* o fotografías aéreas) o bien la interpretación de imágenes multispectrales (ej. *ASTER*) y modelos de elevación de terreno de alta resolución (ej. *LIDAR*), son herramientas fundamentales para elaborar mapas geológicos preliminares que son el insumo más fuerte en la geología con objetivos de exploración geotérmica. Por lo tanto, este paso es crucial para enmarcar la zona de estudio dentro del contexto regional. Por su parte, con los datos aportados por imágenes multispectrales es posible realizar análisis de alteración hidrotermal, vegetación y térmicos, para identificar variaciones en la temperatura superficial. También la interferometría de radar (*InSAR*) es un medio para evaluar la deformación superficial de un campo geotérmico o bien para monitorear fallas activas relacionadas al ascenso de fluidos geotérmicos (Van der Meer *et al.*, 2014).

### III.II.II Vulcanología de campo

La vulcanología es primordial como herramienta en la exploración geotérmica dado que el calor puede estar directamente asociado a procesos plutónicos y volcánicos (Moeck, 2014); asimismo comprender la evolución y estratigrafía volcánica de una zona es crucial para establecer cuáles unidades litológicas son parte de los elementos de un sistema geotérmico. Por su parte, estudios petrográficos pueden mostrar evolución volcánica, diferenciación



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

magmática y procesos petrogenéticos de las rocas circundantes, e incluso propiedades de las rocas en las que está albergado o entrampado el acuífero hidrotermal. La geoquímica de rocas permite evaluar no solo la composición de la roca, sino el ambiente tectónico, lo cual como ya se mencionó se correlaciona directamente con las características geológicas del yacimiento geotérmico.

**III.II.III Catálogo de manifestaciones hidrotermales**

Una técnica de exploración inicial y muy útil es el estudio de las características fisicoquímicas (composición, temperatura, pH, etc.) de las manifestaciones hidrotermales; puesto que son indicativas de los procesos termodinámicos del reservorio, así como del tipo de fuente de calor (Powell y Cumming, 2010). Por su parte, establecer la distribución, abundancia y tendencia estructural de las manifestaciones es una guía para establecer el trazo de una falla mayor, o bien indicativa de un escenario estructural que permite el ascenso de los fluidos (Curewitz y Karson, 1997).

**III.II.IV Geología estructural**

En áreas con potencial geotérmico la región de ascenso de fluidos o *upflow* es el típico blanco, debido a su mayor temperatura relacionada a la cercanía de la fuente de calor (Moeck, 2014). Por lo tanto, la comprensión del escenario estructural de una zona geotérmica es una guía crucial para sugerir perforaciones, precisamente porque permite inferir regiones de ascenso de fluidos, incluso con ausencia de manifestaciones (Rosas-Elguera, 1987; Faulds, 2011; Moeck, 2014; Faulds y Hinz, 2015). Faulds y Hinz, (2015) identificaron dentro de la región del *Great Basin*, ocho escenarios favorables para el ascenso de fluidos geotérmicos; en general estos escenarios están asociados a tectónicas extensivas y transtensivas caracterizadas por intersecciones, terminaciones y vínculos entre segmentos de fallas normales o de rumbo (Ver Fig. 22).

Curewitz y Karson (1997) proponen que, en los ambientes estructurales favorables activos el ascenso de fluidos es favorecido por la acumulación de esfuerzos, que hace que las fracturas se mantengan abiertas en el tiempo independientemente de la precipitación mineral. Por lo anterior es importante dentro del análisis estructural el cálculo del tensor



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

de esfuerzos, puesto que permite evaluar si las fallas y fracturas relacionadas al sistema geotérmico tienen una orientación favorable, lo que implica que son activas. Por lo tanto la geología estructural es parte indispensable para el desarrollo de un campo geotérmico desde la exploración al programa de perforaciones y de éste a la ingeniería de reservorios (Moeck, 2014), su importancia radica en que permite caracterizar uno de los componentes indispensables de un yacimiento, la permeabilidad.

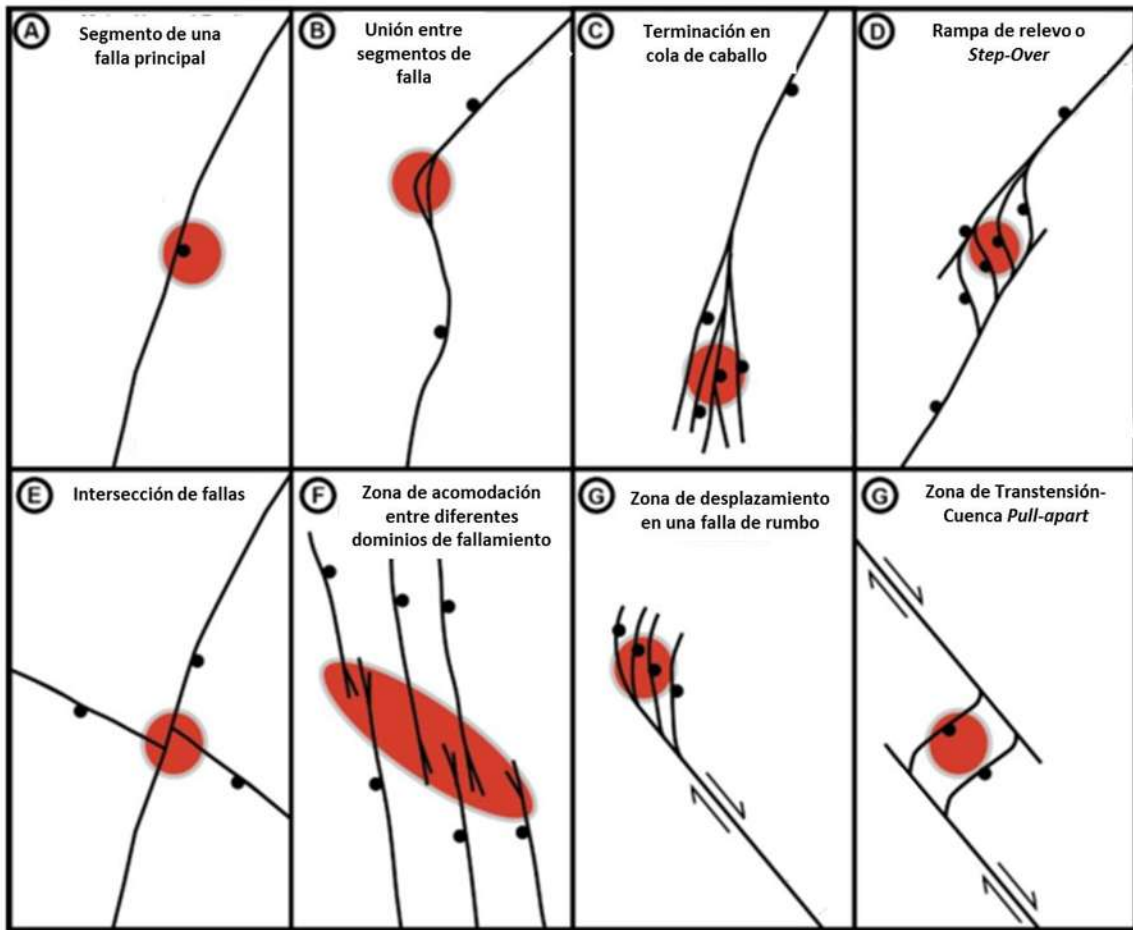


Figura 22. Escenarios estructurales favorables para el ascenso de fluidos hidrotermales (Ejemplos de la Región del *Great Basin*, oeste de EEUU). Imagen tomada de Faults y Hinz (2015).

### III.II.V Técnicas Geofísicas

A nivel geofísico las técnicas resistivas son las más efectivas e importantes para delimitar la zona de ascenso de fluidos (*upflow*), el parámetro esencial es la resistividad eléctrica que se correlaciona inversamente con la temperatura y la alteración hidrotermal (Georgsson, 2009). En este orden de ideas, los sondeos magnetoteléuticos son una de las herramientas más poderosas en el estudio de sistemas geotérmicos (Georgsson, 2009; Moeck, 2014), no obstante, los métodos potenciales (gravimetría y magnetometría) pueden ser también muy efectivos para la prospección geotérmica, sobre todo a nivel de reconocimiento de estructuras regionales y la posible fuente de calor (Manzella, 2000). Estas técnicas tienen la facilidad de ser más económicas y se pueden ejecutar a gran o pequeña escala, por lo tanto, son herramientas útiles dentro de la exploración temprana de un posible yacimiento geotérmico. Para el caso de la República Mexicana, es posible acceder a cartas aeromagnéticas a través del Servicio Geológico Mexicano.

A escala local, los métodos potenciales además de contribuir a interpretar trazos de falla ocultos o delimitar bloques tectónicos, permiten correlacionar anomalías (principalmente positivas) con la posible fuente de calor de un sistema geotérmico en especial en ambientes volcánicos (Manzella, 2000); convirtiéndose en herramientas poderosas dentro de la exploración geotérmica inicial, dado que la presencia de manifestaciones hidrotermales no siempre es indicativa del reservorio geotérmico; puesto que podrían ser la expresión de la zona de descarga del sistema y estar alejadas de la fuente de calor. Dado que el potencial de un yacimiento aumenta en relación a su cercanía a la fuente (temperatura), un estudio geofísico potencial es altamente útil.

#### *Magnetometría*

La técnica magnetométrica básicamente permite medir las variaciones del campo magnético terrestre en un sitio determinado y con base en ellas es posible proponer un modelo de la geología del subsuelo apoyado por los conocimientos geológicos previos del área. La magnetita es el mineral ferromagnético más común y por lo tanto controla la permeabilidad magnética en las rocas, dada esta propiedad, el método magnético ha sido



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

usado para identificar masas de rocas ígneas con una relativa alta cantidad de magnetita o minerales asociados donde el gabro y el basalto son las rocas con mayor susceptibilidad (Manzella, 2000).

En concreto, la técnica magnética aplicada a la exploración geotérmica permite la definición de estructuras regionales asociadas al ascenso de fluidos hidrotermales, así como la prospección de una fuente de calor generalmente asociada a cámaras magmáticas superficiales en enfriamiento (anomalía positiva) y la identificación de zonas con baja magnetización producto de la actividad térmica (anomalías negativas) (Hui *et al.*, 2015). Para el caso de Ixtlán, un estudio magnetométrico es una excelente opción teniendo en cuenta la geología principalmente volcánica de la zona y los posibles contrastes que darían los sedimentos lacustres y aluviales en el Valle de Ixtlán.



## Capítulo IV. Metodología

Inicialmente se efectuó una investigación sobre técnicas para la exploración geotérmica, puesto que es evidente la importancia de este conocimiento para plantear la metodología de estudio de un sistema geotérmico. Asimismo, se revisó el estado del arte, es decir el conocimiento geológico, litológico, mineralógico, hidrogeoquímico y geofísico disponible de la ZGIH, para concatenarlo con nuevos hallazgos a nivel geológico, volcano-estratigráfico, estructural y magnetométricos locales, producto de la presente investigación. En general, la metodología se divide en ocho etapas, como se ilustra en el siguiente diagrama de flujo:

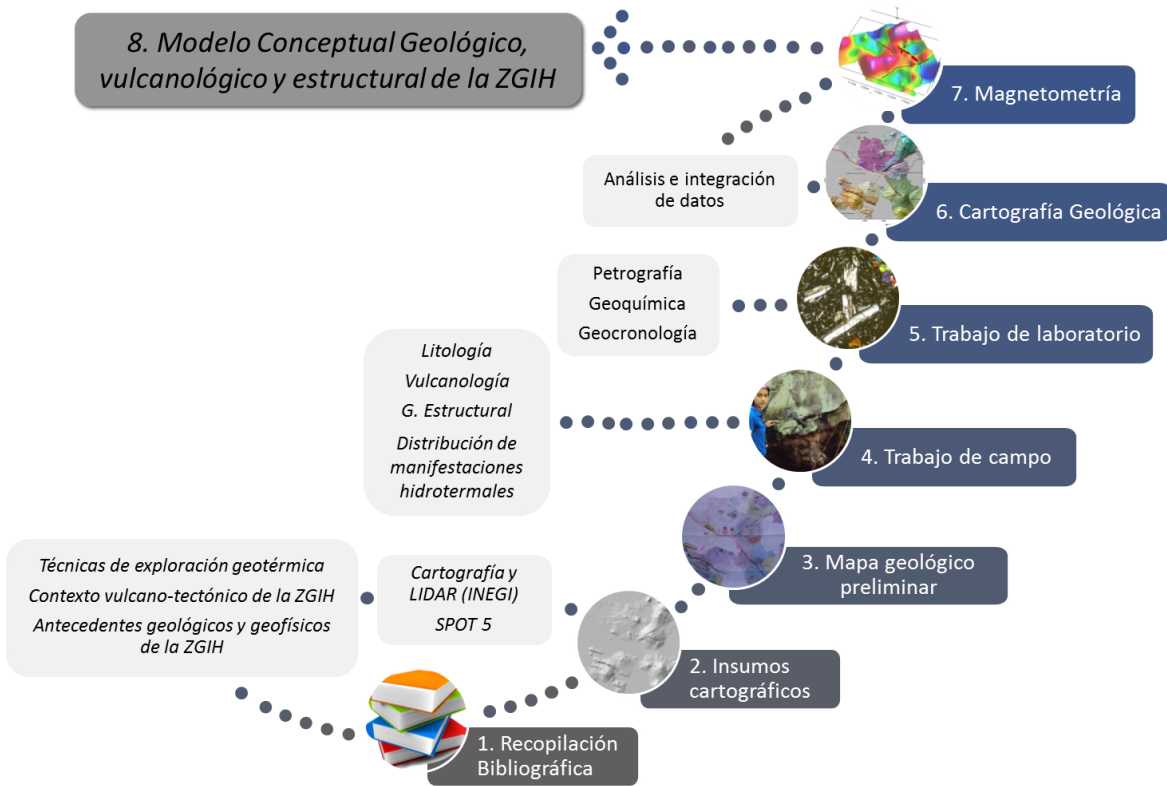


Figura 23. Diagrama de flujo que ilustra las ocho etapas de la presente investigación.

#### IV.1 Geología

Se procedió a elaborar una serie de mapas en el *software ArcGIS 10.3* con apoyo de imágenes satelitales (ej. *Google Earth*), el Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM 3.0), cartas topográficas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), e imágenes del satélite *SPOT 5*; los mapas elaborados fueron: topográfico, altimétrico, de relieve sombreado y pendientes; permitiendo la producción de un mapa geológico preliminar, el cual fue la base para el diseño del trabajo de campo que tendría como objetivo la cartografía geológica-vulcanológica y estructural de la ZGIH; así como la recolección de muestras para el análisis en laboratorio de las características petrológicas y/o geoquímicas de las unidades de roca que afloran en la zona de estudio.

El desarrollo del trabajo de campo tomó dos objetivos preferenciales: uno, establecer la estratigrafía volcánica de la zona y su composición mineralógica; dos, diferenciar el fracturamiento por procesos tectónicos del producido por enfriamiento en edificios volcánicos (Fig. 24), y comprender la relación estructura-vulcanismo con el sistema geotérmico.

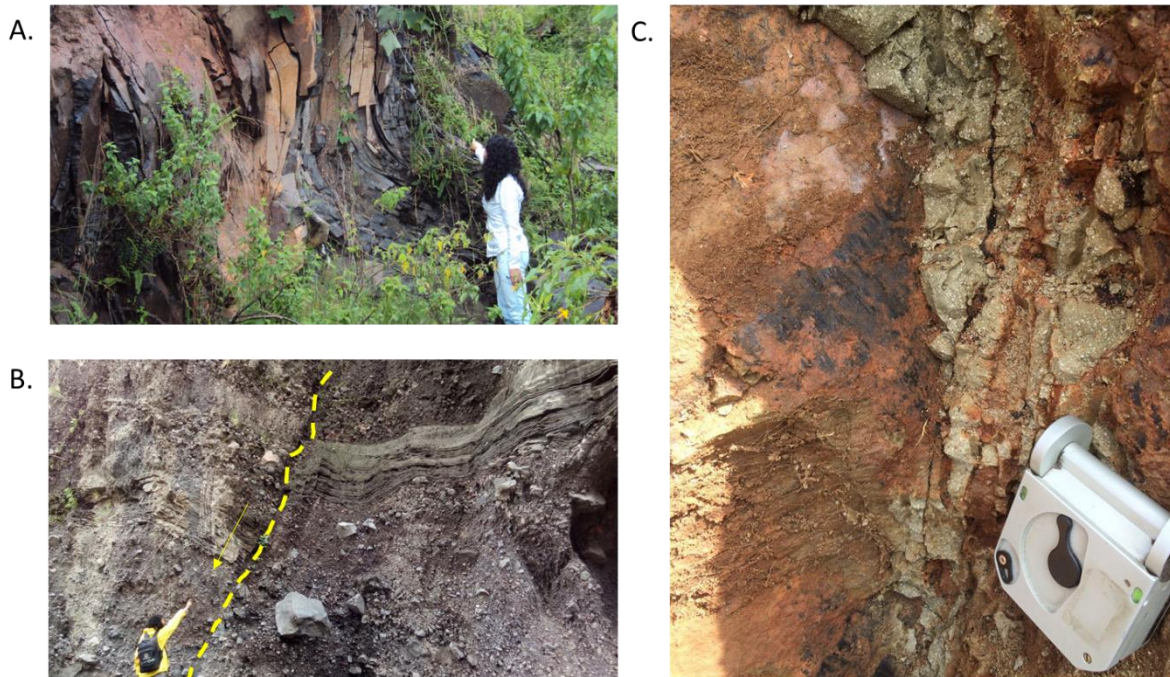


Figura 24. Ejemplo de diferenciación entre el fracturamiento por enfriamiento (A.) del fracturamiento y fallamiento producido por procesos tectónicos (B. y C.).

#### IV.1.1 Geología superficial del subsuelo

Se realizó un estudio litoestratigráfico en determinadas zonas para conocer las características del subsuelo superficial; esto último con el objetivo de obtener información de los últimos eventos de la evolución geológica de la ZGIH, la profundidad del nivel freático y la dirección de flujo del acuífero termal superficial. Para ello se plantearon 14 sondeos geológicos (con pico y pala, Fig. 25), dentro del predio perteneciente al Centro Recreativo “El Géiser de Ixtlán”, donde se localizan manifestaciones hidrotermales. Los sondeos geológicos se distribuyeron estratégicamente y a una profundidad dependiente del nivel freático.

Posteriormente, los sondeos fueron limpiados con un *scraper* para realizar el levantamiento de columnas estratigráficas e identificar la geología del subsuelo. Las columnas estratigráficas se realizaron identificando el tipo de material y su composición mineralógica a través de una lupa con un aumento de 10x y 20x, además se midió el espesor de cada estrato y la profundidad a la que se encontró el nivel freático, así como la temperatura del agua encontrada. La descripción de estratos constó de color, tipo de material, granulometría, contenido de materia vegetal, cerámica, escoria volcánica y fragmentos líticos. En gabinete se utilizó el programa *Corel Draw X7* para digitalizar a escala las columnas obtenidas en campo, lo que permitió realizar correlaciones estratigráficas.



Figura 25. Ejemplo de sondeos geológicos realizados en el predio del Centro recreativo “El Géiser de Ixtlán”

## IV.II Vulcanología

Para cualquier interpretación volcano-estratigráfica el mapa geológico desarrollado a través de la descripción detallada de campo y la definición de los polígonos litológicos, fue el insumo fundamental para la comprensión del tipo, estilo, distribución y tendencia estructural de los edificios volcánicos. Parámetros geomorfológicos tanto en campo, como en el momento de interpretar el mapa geológico son sugerentes del tipo y estilo eruptivo del volcán, incluso su composición mineralógica; sin embargo, esta última fue constatada bajo observaciones en el microscopio petrográfico de cada unidad litológica. Asimismo, se realizaron análisis geoquímicos a ciertas muestras de roca. La estratigrafía volcánica se estableció a partir de relaciones de superposición observadas en campo, criterios geomorfológicos indicativos de su edad como evidencia de erosión o fallamiento, fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de los principales edificios volcánicos e información magnetoestratigráfica de Rosas Elguera y Urrutia-Fucugauchi (1992).

### IV.II.I Petrografía

Para comprender la petrogénesis del vulcanismo circundante a la ZGIH, se recurrió a la petrografía; seleccionándose 32 muestras de lavas para la elaboración de sus correspondientes láminas delgadas en el Laboratorio de Laminado del Instituto de Geofísica de la UNAM en Morelia. Las muestras fueron cortadas y sometidas a diferentes abrasivos; seguidamente pegadas cada una a un portaobjetos (previamente desbastado) con bálsamo de Canadá y nuevamente sometidas a abrasivos hasta lograr un espesor aproximado de 30  $\mu\text{m}$  (Fig. 26).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO



Figura 26. En esta imagen se observa como las láminas delgadas después de ser pegadas a sus portaobjetos son sometidas por segunda vez a abrasivos. Este proceso se realizó hasta lograr un espesor aproximado de 30 $\mu$ m en cada una.

A continuación, se procedió a analizarlas en un microscopio petrográfico mediante la descripción y caracterización a nivel textural y mineralógico; adicionalmente, se realizó una apreciación visual del contenido porcentual de sus componentes que apoya la clasificación modal según las recomendaciones de *The international of Geological Sciences Subcomission on the Systematics of Igneous rocks* y se tomaron fotografías representativas de la roca a escala. Dicha información se plasma con mayor detalle en el apartado de Anexos Petrografía con las fichas descriptivas de cada lámina delgada; la Fig. 27 es un ejemplo.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

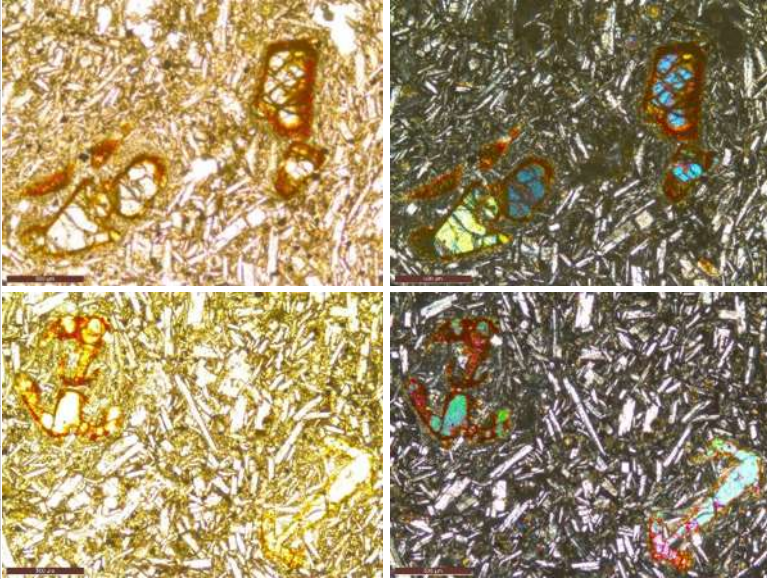
<b>IRX-04</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Encinal (sector SO)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto olivínico			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfirítica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, <i>sieve</i> en fenocristales de plagioclasas, reabsorción avanzada y bordes de reacción en olivino, poiquilítica de minerales opacos en olivino, poiquilítica de olivino en plagioclasa, glomeroporfirítica de plagioclasa y olivino			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, traquítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino	21%
		Opacos	1%
		Ortopiroxeno	4%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 4%			
Iddingsita	4%		
		<b>Observaciones:</b> Xenocristales de olivino con reabsorciones muy avanzadas que implican un magma parental básico. Plagioclasas muy tabulares, minerales como el ortopiroxeno e incluso las plagioclasas crecieron a partir del olivino, también olivinos con reabsorciones internas	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>	

Figura 27. Ejemplo de fichas que se pueden consultar en el apartado Anexos; obsérvese el detalle en la descripción textural y mineralógica, así como su clasificación según *Streckeinse, 1991*, adicionalmente un registro de microfotografías; ejemplo de la muestra IRX-4.

#### IV.II.II Geoquímica

Gracias a los resultados obtenidos en la petrografía, se observó que en general las muestras de rocas volcánicas no presentan alteración importante y que son aptas para un análisis geoquímico. Teniendo en cuenta su composición y clasificación a través de la petrografía, así como su localización y posible significancia vulcanológica se eligieron muestras de 12 edificios volcánicos.

En el Laboratorio de Partículas Gruesas del Instituto de Geofísica de la UNAM, Morelia, se procedió a un lavado y secado de trozos de una cada muestra libre de alteración, intemperismo, amígdalas y fracturas rellenas de otros minerales; cuidando que fuese la cantidad suficiente (aproximadamente 40gr) y que representaran estadísticamente la muestra.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Posteriormente, se procedió a insertarlos en los discos de pulverización previamente limpiados con acetona y luego a accionar la maquina pulverizadora; este primer producto fino funciona como material para limpiar el disco; dicho proceso se realiza dos veces, es decir, el mismo polvo obtenido de la roca funciona como material de limpieza; ello con el objetivo de asegurar la pureza en el análisis (Fig. 28). Finalmente se adicionan más trozos de muestra y se acciona de nuevo la pulverizadora para obtener el material que será analizado en un laboratorio. Este proceso se realizó para cada una de las 12 muestras, obteniéndose aproximadamente 20gr por muestra; este material se etiquetó individualmente y fue enviado a *Activation Laboratories Ltd* en Canadá para un análisis cuantitativo de roca total de elementos mayores, traza y tierras raras a través de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS siglas en inglés), como fundente fue usado el metaborato y el tetraborato de litio.



Figura 28. Discos de la Pulverizadora con residuos de una primera pulverización, dicho polvo funcionó como material de limpieza. Obsérvese que se insertaron nuevos trozos de la muestra entre los espacios del disco, luego se procede a accionar la maquina pulverizadora y se realiza una segunda limpieza con la misma muestra.

Los resultados del análisis fueron tratados para cerciorarse que fuesen en base anhidra, es decir, fueron eliminadas las perdidas por ignición (LOI siglas en inglés) y los datos se recalcularon al 100%, como es indicado por la Unión Internacional de Ciencias Geológicas



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

(IUGS). Los valores recalculados fueron graficados en los diferentes diagramas geoquímicos en el programa IGPET 2007.

**IV.II.III Geocronología**

Se efectuaron fechamientos con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  a 7 muestras de lavas, en colaboración con la Dra. Marnie Forster del *RSES Argon Laboratory* de la Universidad Nacional de Australia. Las muestras fueron cortadas cuidando que ésta presentara el menor grado de alteración posible y que estuviese libre de fracturas o amígdalas con rellenos minerales secundarios; posteriormente fueron enviadas al laboratorio de geocronología donde fueron seleccionados trozos de la muestra libres de fenocristales, proceso conocido como separación mineral. Y luego fueron llevadas al reactor nuclear.

El análisis se realizó usando el método de calentamiento paso a paso en vez del método de fusión con láser. Se extrajo y midió el Argón remanente en un promedio de 30 pasos a temperatura controlada. Este proceso tomó hasta un día completo por cada muestra, pero dio la garantía de una mejor obtención de datos de la muestra en comparación a anteriores experimentos con el método de fusión con láser de 2 y 3 pasos.

A manera de resumen el mapa de la Fig. 29 muestra la localización de las muestras seleccionadas para estudios petrográficos, geoquímicos y geocronológicos.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

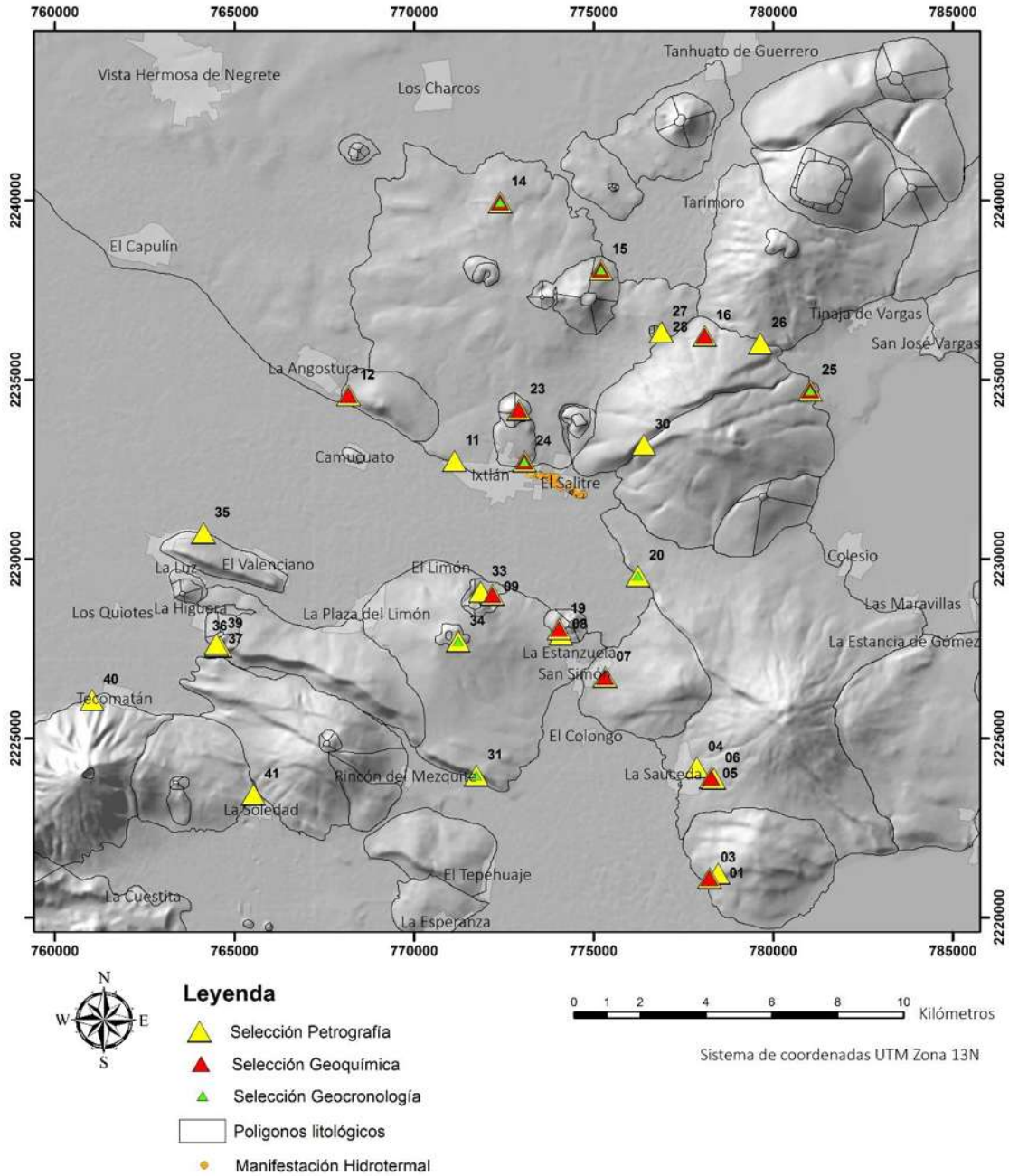


Figura 29. Localización de las muestras seleccionadas para Petrografía, geoquímica y Geocronología  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .



### IV.III Geología Estructural

Se efectuó el levantamiento de estructuras que afectan a las unidades que componen el yacimiento geotérmico; los datos obtenidos fueron analizados en el programa *WinTensor V.5.0.1*; dicho software realiza análisis estadísticos y cinemáticos de fallas y fracturas y se alimenta con una serie de parámetros colectados en campo como: dirección e inclinación de planos de fallas y fracturas, ángulo de *pitch*, tipo de falla (normal, inversa, lateral) o fractura según lo observado. El resultado son diagramas del cálculo del campo esfuerzos y la determinación de las sigmas ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ ) expresados en diagramas, *PBT Axes* (Fig. 30). Durante el trabajo de campo y gabinete siempre se tuvo en cuenta el contexto tectónico regional es decir la mezcla entre la tectónica extensiva y transtensiva de la zona de estudio; para establecer relaciones vulcanismo-fallamiento-sistema geotérmico.

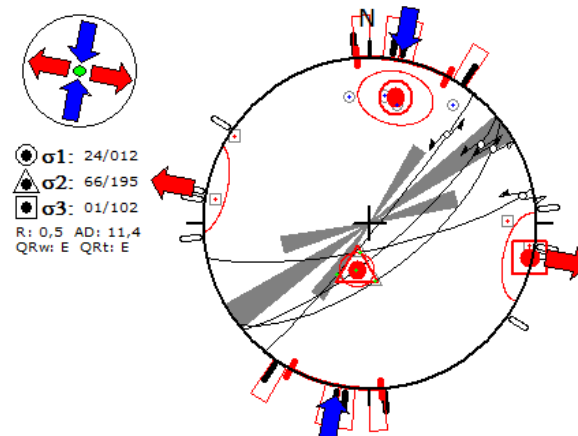


Figura 30. Ejemplo del tensor de esfuerzos calculado por el *software WinTensor V.5.0.1*, para la Falla Nogales.

Además, para conocer la distribución espacial de las manifestaciones hidrotermales de la ZGIH y su relación con las principales fallas, estas fueron ubicadas a través del sistema de coordenadas UTM (*Universal Transversal Mercator*), con el apoyo de un *GPS Trimble Nomad 1050 LE*. Localizada la manifestación, se midió su temperatura en grados centígrados mediante un pirómetro infrarrojo; el rayo infrarrojo fue proyectado sobre la manifestación hidrotermal a un  $\leq 1$  metro de distancia (Fig. 31).

MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO



Figura 31. Ejemplo de medición de temperatura en manantial hidrotermal con pirómetro infrarrojo.

Manantial el Pozo Loco.

Adicionalmente se consideraron características como color del agua, gas (burbujeo), vapor, escorrentía, contenido de materia vegetal, presencia o no de depósitos hidrotermales, diámetro de la fuente termal y dirección del eje principal de la manifestación; ello para identificar posibles tendencias estructurales. Finalmente, los datos fueron compilados sobre una base de datos *Excel* y georreferenciados en el *software ArcGIS V.10.3*.

#### IV.IV Magnetometría

Para definir el trazo de las estructuras regionales y la búsqueda de la posible fuente de calor se utilizaron dos magnetómetros G-857 *Geometrics* de tipo precesión protónica (Fig. 32). Uno es utilizado como estación base y otro como estación móvil con un sistema de georreferenciación por un *GPS Garmin Oregon 450*.

Las especificaciones técnicas del equipo utilizado se resumen en la siguiente tabla:

Especificaciones Magnetómetro G-857	
Resolución	0.1 nT
Precisión	Absoluta 0.5 nT
<i>Tuning</i>	Auto o manual Rango 20000-90000
Ciclo de tiempo	Estándar 1.6 seg a 999 seg
Lectura	Manual o automática
Reloj	Fecha en formato Juliano
Tolerancia de gradiente	1000 nT/metro
Lectura	Discreto y continuo para estación base
Memoria	65000 mediciones
Georreferenciación	<i>GPS Garmin Oregon 450</i>
Ambiente	Satisfactoriamente desde -20° a 50° C.
Alimentación	Batería de gel recargable 12 Volt

Tabla 4. Especificaciones del Magnetómetro G-857 *Geometrics*.



Figura 32. Magnetómetros de precesión protónica G-857, estación base utilizada en el área de Ixtlán de los Hervores.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Para las campañas de exploración geofísica se realizaron las siguientes actividades divididas en dos etapas; la primera fue la etapa de gabinete donde se concentró inicialmente en la recopilación y análisis de la información bibliográfica y cartográfica existente, así como de la información magnética y geodésica del área de estudio. Se consultó la carta aeromagnética Pajacuarán (F13-D88) elaborada por el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en 1998 (Fig. 17).

Con el fin de determinar los lugares de interés y programar las campañas de muestreo a semi-detalle, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La extensión de las zonas con manifestaciones hidrotermales y estructuras geológicas de interés (Falla Ixtlán y Nogales) cartografiadas previamente para limitar las dimensiones de área de estudio.
- Las condiciones del terreno y con ello la logística para la configuración de la rejilla de muestreo y la planeación de los recorridos en campo.

Por lo anterior, se plantearon ocho líneas de muestreo magnetométrico. Seis con dirección NE-SO separadas por 1km. Mientras que los perfiles NO-SE fueron utilizados como *tielines*. Con estaciones de muestreo cada 100 y 200 m. Las líneas de muestreo fueron elaboradas a través del software *MagLog v. 3.39b 10/17/2014 beta* y se plantearon a través de coordenadas geográficas decimales obtenidas en el *software Google Earth v. 7.1.5.1557* para ser utilizados por el *GPS* incorporado.

El área de estudio comprende principalmente terrenos de cultivo, localizados en el valle de Ixtlán donde los sedimentos lacustres de paleolago de Chapala se han acumulado en los últimos millones de años. Este sitio es el más llamativo para la prospección magnética y la caracterización de estructuras geológicas debido a la cercanía a las manifestaciones hidrotermales y las posibles fallas ocultas bajo los sedimentos en la zona seleccionada.

A partir de los sitios elegidos en la etapa de gabinete, se llevó a cabo el levantamiento magnético local a semi-detalle en el valle de Ixtlán. El muestreo de datos presento un número reducido de dificultades debido a infraestructuras urbanas, en el menor de los



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

casos fue necesario alterar la ubicación de los puntos preestablecidos a una distancia razonable sobre la línea de muestreo o en su defecto saltar una estación de medida; como se puede ver en la Fig. 33, se procuró que el muestreo siguiera una tendencia lineal.

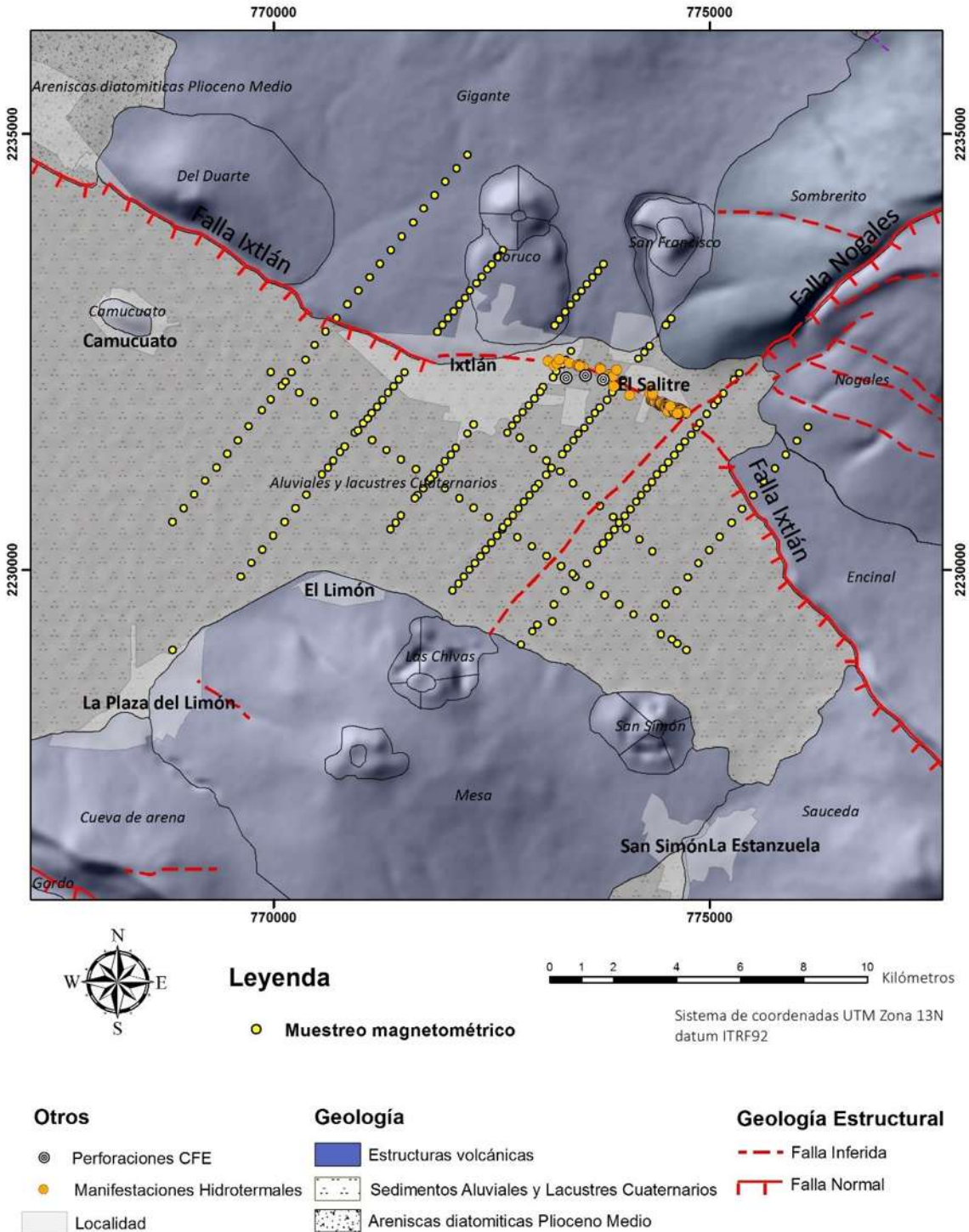


Figura 33. Muestreo magnetométrico (puntos amarillos) en la zona de Ixtlán.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

El procesamiento de los datos comienza desde la revisión diaria de los datos después de una campaña de muestreo, revisando los resultados para observar anomalías en el valor de los datos, picos anómalos (*spikes*) que no corresponden al campo teórico esperado para la zona, muchas veces debido a errores en la medición, que mayoritariamente son de muy corta duración y pueden corresponder a errores en la componente de medición en el equipo o a perturbaciones por posibles cuerpos enterrados con nulo interés geológico. La descarga de datos se realiza mediante el *software Magmap2000*, considerando la hora de la consola y la posición otorgada por el GPS navegador, en el sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) para una mejor comprensión de las dimensiones.

Los datos fueron exportados en un formato compatible con *Excel*, y corregidos por variación diurna, con los datos obtenidos por el Observatorio Geomagnético de Teoloyucan, Estado de México, con las coordenadas 19° 44' N y 99° 11' O, que utiliza un magnetómetro tipo *Overhauser Processor Sensor*. Posteriormente fueron sustraídos el valor del campo teórico, obtenido del *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Los datos fueron analizados por cada perfil, con la intención de identificar las anomalías magnéticas y zonas con un gradiente horizontal importante relacionadas con zonas de fallamiento.

A continuación, se aplicó el método *Kriging Simple Ordinario* para interpolar los datos de campo magnético total teniendo en cuenta que para punto en el espacio corresponde un valor de campo magnético (variable aleatoria regionalizada), definiéndose la función aleatoria, es decir el conjunto de datos magnéticos distribuidos en el espacio. Utilizando el *software ArcGIS 10.3* se realizó un análisis geoestadístico con la herramienta *Geostatistical Wizard* de *ArcMap* (Fig. 34), observándose que los datos tienen una distribución normal o gaussiana (con la distribución *Student's*) (Fig. 34A) y se procedió a realizar un análisis estructural donde se estimó (semivariograma experimental) y modeló (semivariograma teórico) la función aleatoria obteniéndose la meseta a 0.85 km y estabilizándose a los 1.52 km (Fig. 34B), lo que indica que la interpolación (predicción espacial) a realizar será válida hasta esta última distancia entre punto y punto de muestreo. Finalmente, la Fig. 35, muestra un mapa de anomalía magnética a partir de los datos del campo magnético total corregidos.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Asimismo, se relacionaron los datos de campo magnético predichos con los medidos en campo (Fig. 34C) concluyéndose que el distanciamiento entre líneas ha dejado zonas con menor cantidad de datos que otras; no obstante, los resultados son suficientes para una interpretación cualitativa que cumple el objetivo del estudio magnético.

Es de resaltar que esta etapa también formó parte de un informe sobre el riesgo del área del centro recreativo el “Géiser de Ixtlán” y fue auspiciado por la presidencia municipal de Ixtlán de los Hervores 2015-2018 (Ver Garduño-Monroy *et al.*, 2016).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

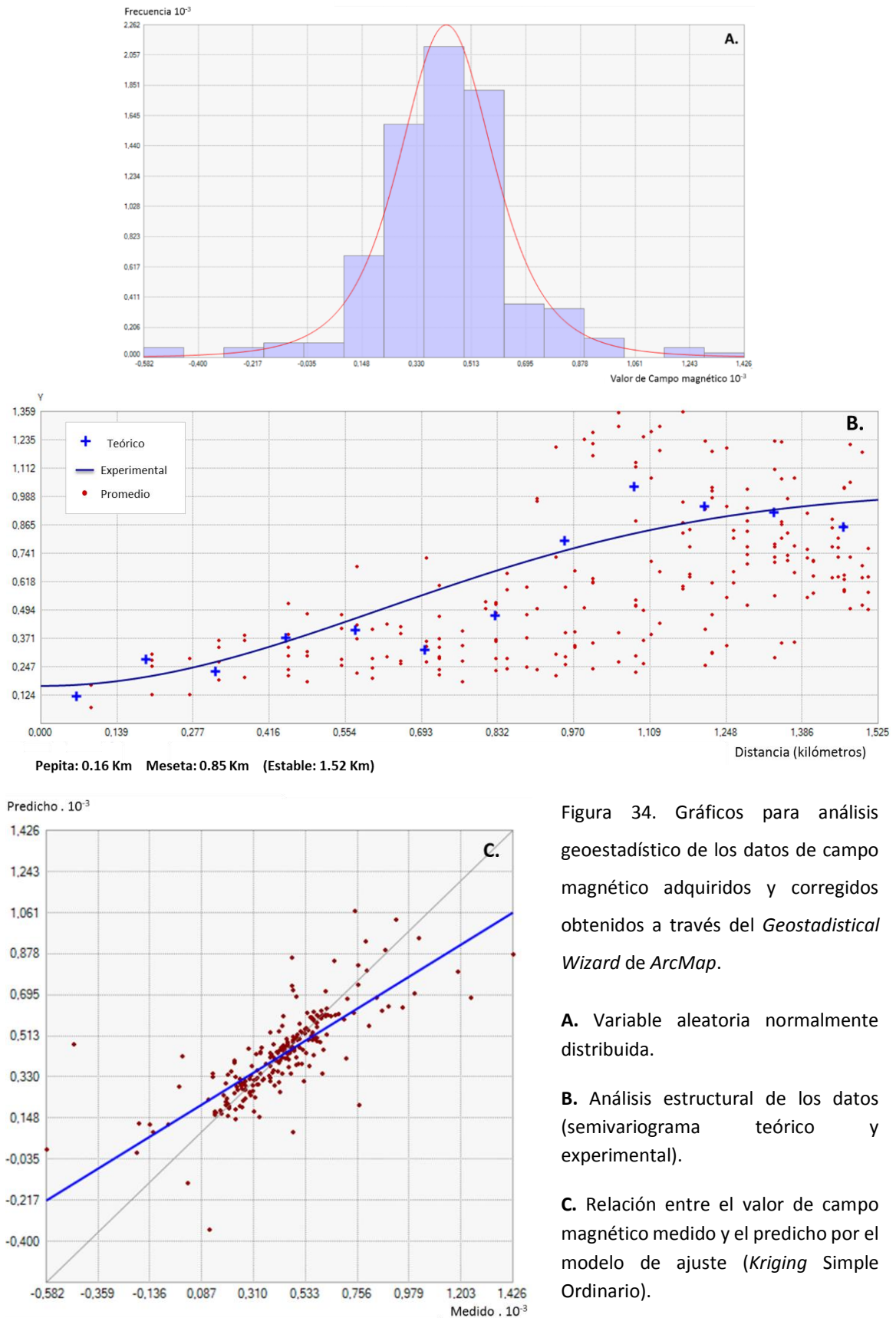


Figura 34. Gráficos para análisis geoestadístico de los datos de campo magnético adquiridos y corregidos obtenidos a través del *Geostatistical Wizard* de *ArcMap*.

**A.** Variable aleatoria normalmente distribuida.

**B.** Análisis estructural de los datos (semivariograma teórico y experimental).

**C.** Relación entre el valor de campo magnético medido y el predicho por el modelo de ajuste (*Kriging Simple Ordinario*).



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

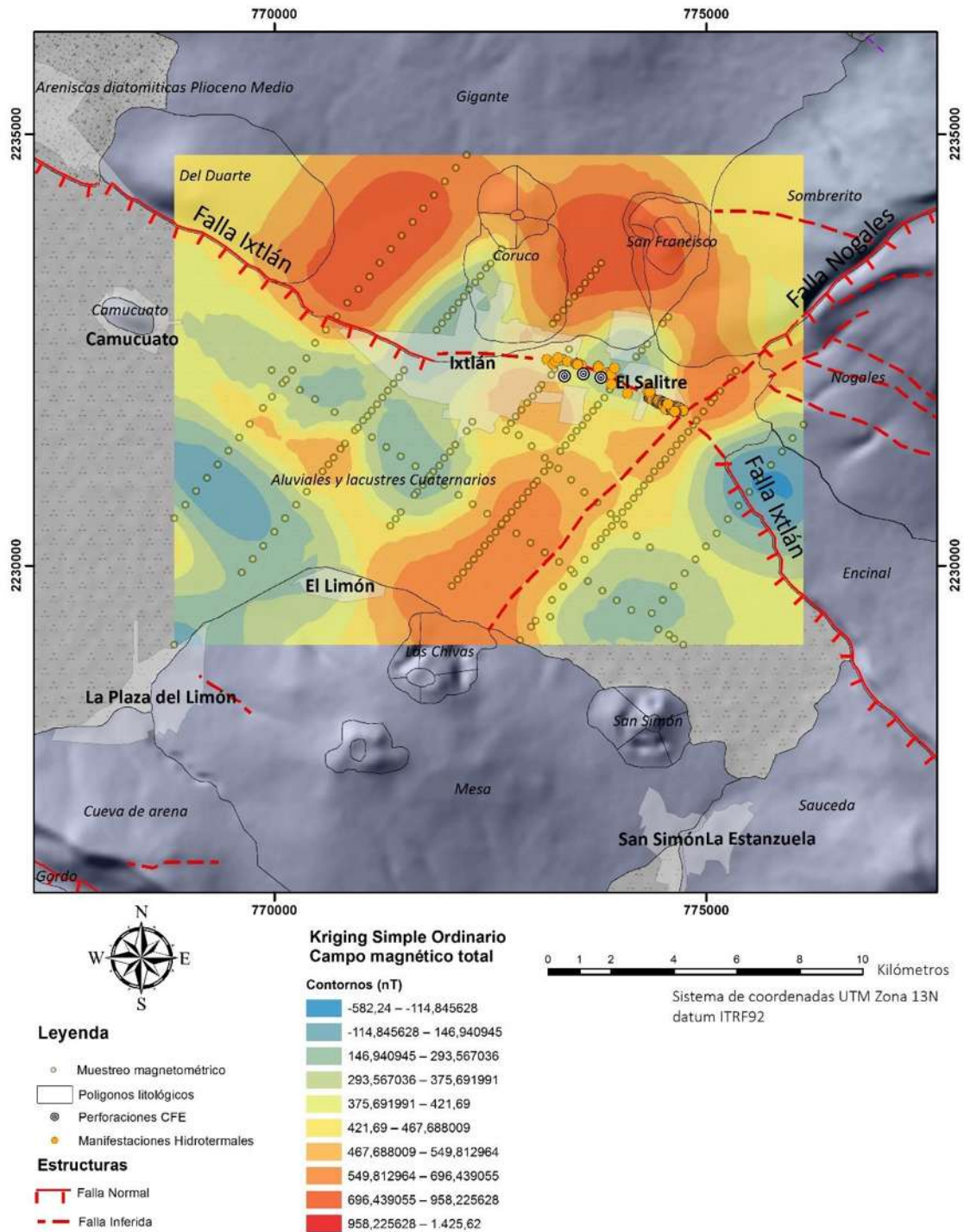


Figura 35. Interpolación de los datos de campo magnético total con el método *Kriging Simple Ordinario*.



## Capítulo V. Resultados

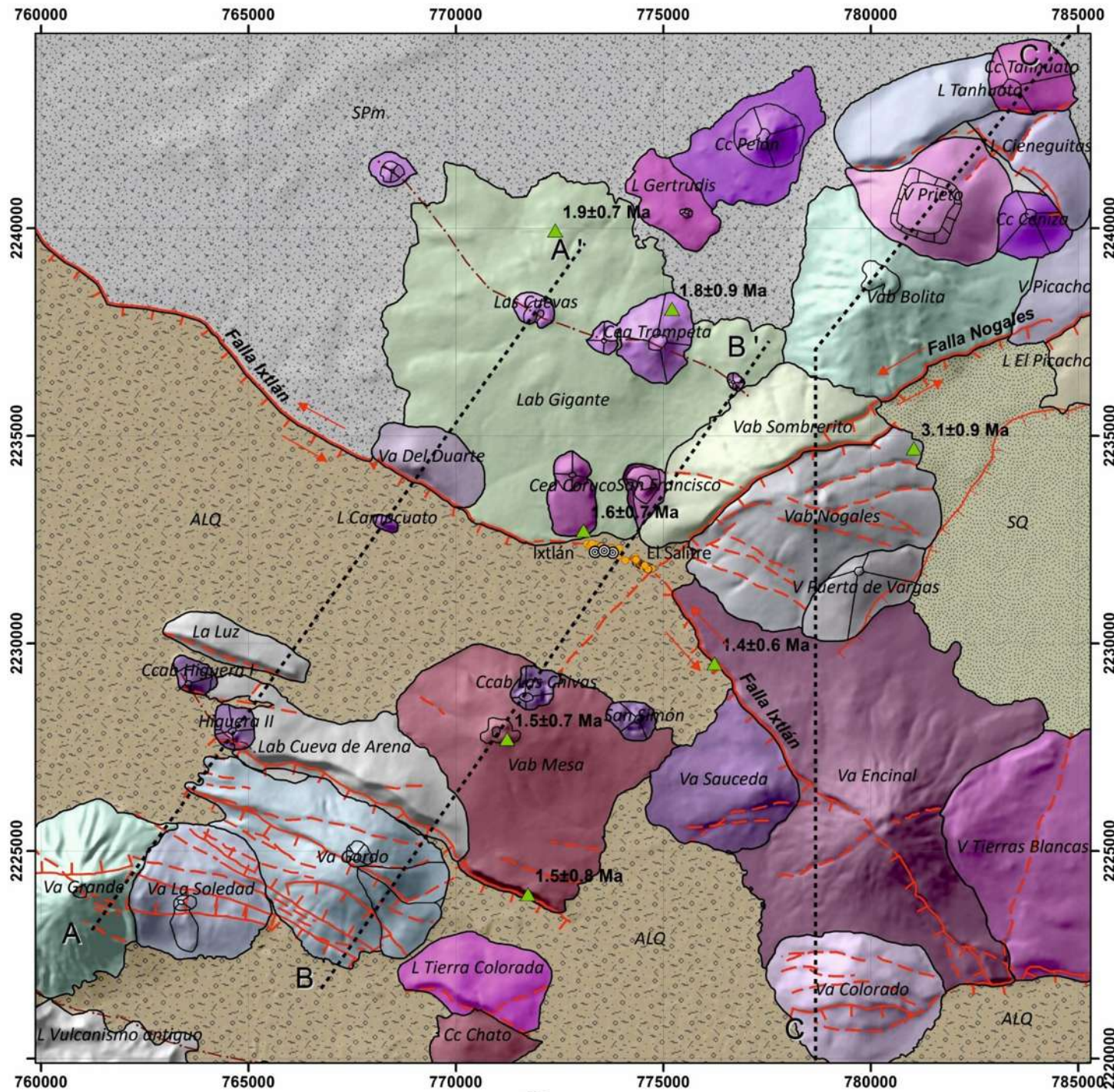
### V.I Cartografía Geológica

Gracias al trabajo de campo se delimitaron los polígonos litológicos del área de estudio, observándose que en la zona priman unidades de rocas ígneas volcánicas y sedimentarias de ambiente lacustre y aluvial. La Figura 36, ilustra la geología de la ZGIH a través de un mapa geológico que consta de una leyenda completa donde se definió la estratigrafía, las fallas, fracturas eruptivas, manifestaciones hidrotermales y estructuras volcánicas del área. Este mapa corresponde a un resumen de los resultados que se irán desglosando en el resto del capítulo.

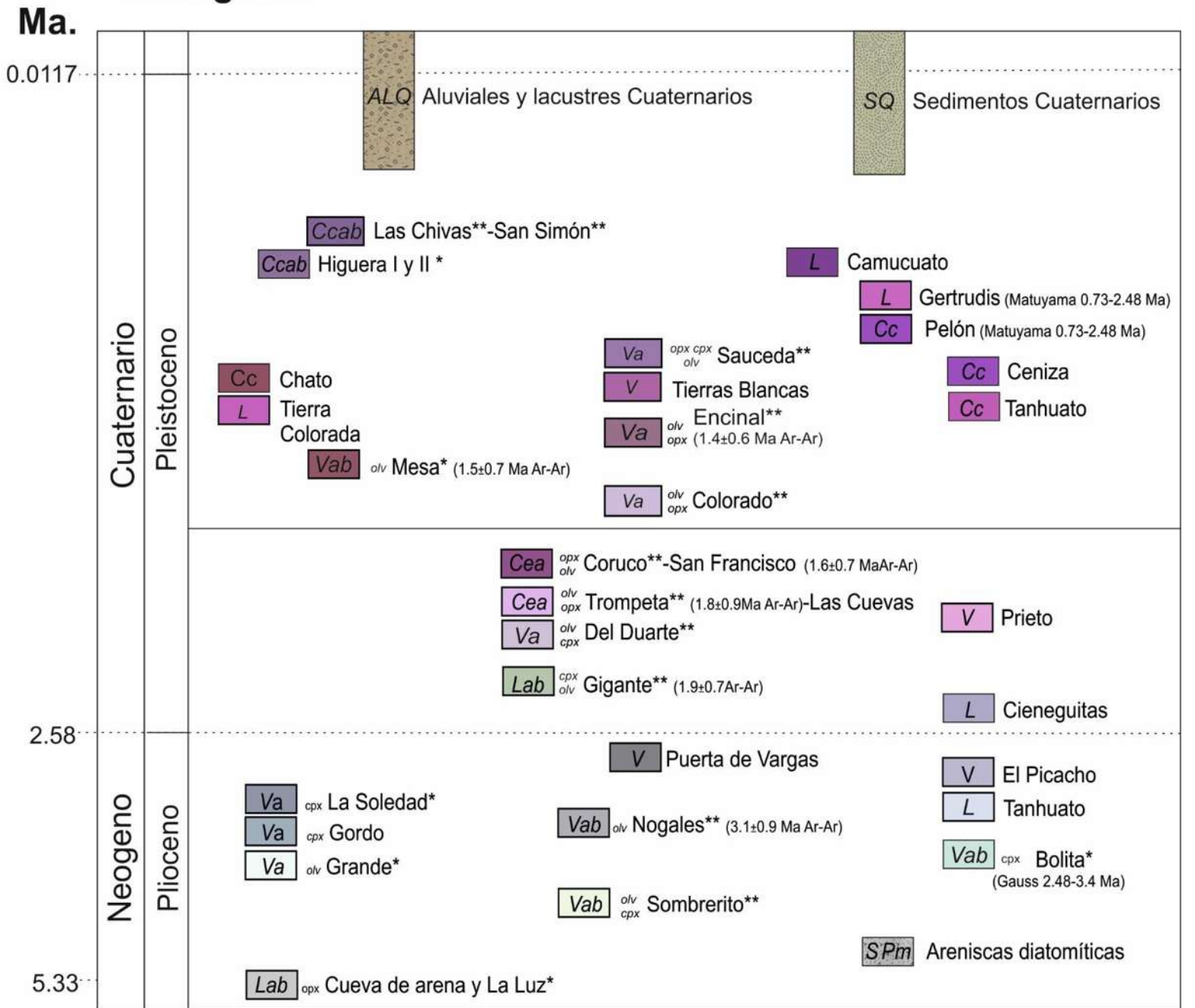


MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO



Estratigrafía



Leyenda

Geología

- Manifestaciones Hidrotermales
- Litología
- ▲ Geocronología <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar

Geología Estructural

- - - - - Falla Inferida
- ▬▬▬ Falla Normal
- · - · - Fractura eruptiva

Otros

- ⊙ Perforaciones CFE
- - - - - Perfiles Geológicos

Claves

- V Volcán (Semi-escudo)
- L Lava
- Cc Cono cinerítico
- Ce Cono de escoria
- ab andesítico-basáltico
- a andesítico
- olv olivino
- opx ortopiroxeno
- cpx clinopiroxeno

Ej. Vab olv opx = Volcán escudo andesítico basáltico con olivino y ortopiroxeno

- \* Tiene petrografía
- \*\* Tiene petrografía y geoquímica

SPm Sedimentos del Plioceno medio  
ALQ Aluviales y lacustres Cuaternarios  
SQ Sedimentos Cuaternarios

## V.II Estratigrafía

Los criterios para evaluar la edad de cada centro volcánico fueron los fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , la morfología de cada edificio, las relaciones de superposición establecidas durante el trabajo de campo y algunos datos de paleomagnetismo sustraídos de Rosas Elguera y Urrutia-Fucugauchi, (1992 y 1994). Para las unidades sedimentarias, también se aplicaron relaciones de superposición.

### *Eventos Mioceno-Plioceno inferior*

En la ZGIH, este vulcanismo está representado por las lavas andesítico basálticas con ortopiroxeno de La Cueva de Arena y La Luz, que se interpretan como remanentes de un edificio volcánico exhumado a través del corredor de fallas Mezquite.

### *Sedimentos del Plioceno medio*

Al norte del área, se identificó una unidad denominada *SPm*, la cual fue analizada a través de frotis de una muestra que permitió observar múltiples cristales principalmente de cuarzo y feldespatos, así como diatomeas. Esta unidad, presenta estratos de color blanco a crema y sus partículas son tamaño limo a arena media, asimismo en muestra de mano se observaron macrofósiles de bivalvos, gasterópodos y bioturbación sugiriendo un ambiente depositación lacustre (Fig. 37 A y B).

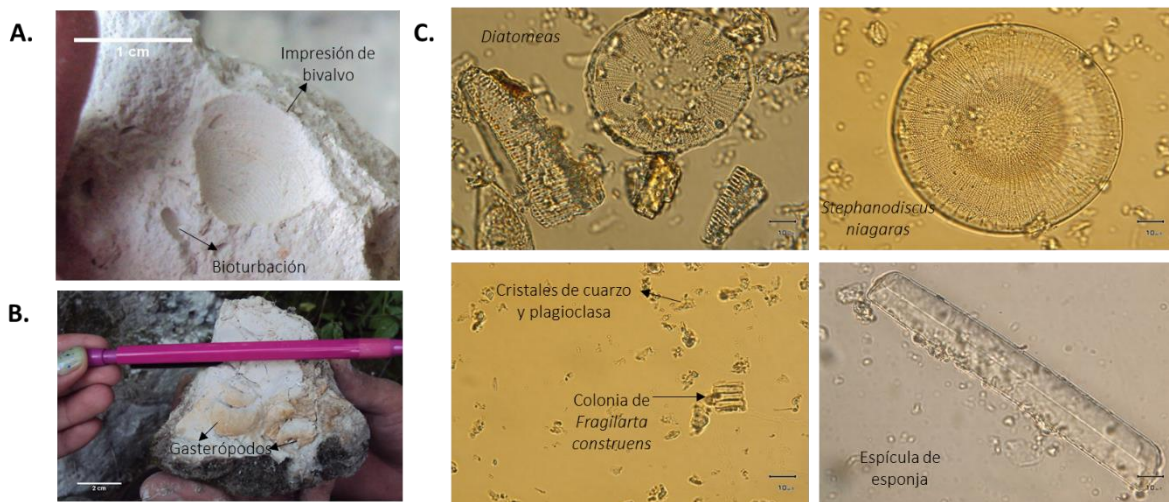


Figura 37. Ejemplos de fósiles y cristales observados en *SPm*. **A.** Impresión de bivalvo y bioturbación, **B.** Gasterópodos. **C.** Ejemplos de diatomeas, cristales y espícula de esponja.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Las diatomeas reconocidas fueron, *Cocconeis placentula*, *Cymbella cymbiformis*, *Stephanodiscus niagarae*, *Epithemia turgida* y *Fragilaria construens* indicativas de un paleolago somero rico en nutrientes, con abundante vegetación acuática y oleaje (Fig. 37C). Concluyéndose que *SPm* corresponde a una secuencia e caídas de ceniza en agua y depositación lacustre, la cual según Rosas-Elguera, Urrutia-Fucugauchi y Maciel, (1989) fue depositada durante el Plioceno medio. No obstante, bajo *SPm* otros depósitos lacustres (areniscas y lodolitas diatomáceas) contemporáneos fueron observados intercalándose con lavas de composición andesítico basáltica. La importancia geotérmica de esta unidad radica en que se puede interpretar como parte de la unidad sello del yacimiento.

*Eventos Plioceno medio-superior*

Posterior a *SPm*, se presentó un vulcanismo efusivo andesítico basáltico a andesítico, caracterizado generar morfologías de semi-escudos y derrames de lava. La actividad andesítica se concentra en el sector SO de la zona de estudio sobre la sierra de Pajacuarán, con los volcanes Grande, Gordo y La Soledad; mientras en el sector noreste, se concentra la actividad andesítico basáltica de los volcanes Sombrerito (considerado como el más antiguo de la zona), Bolita (2.48-3.4 Ma) y Nogales (3.1±0.9 Ma) de composición andesítico basáltica.

*Eventos Pleistoceno*

Sobre *SPm*, pero al norte de la zona de estudio se encuentra un subgrupo de volcanes de edad Pleistoceno inferior; esté vulcanismo inició con el derrame de lava Gigante (1.9±0.7 Ma), el cual fue coronado por el volcán Del Duarte, posteriormente por los conos de escoria (*Ce*) andesíticos asociados a una fractura eruptiva NO-SE (*Ce* Trompeta 1.8±0.7 Ma) y finalmente por los conos de escoria y derrames de lava asociados del *Ce* Coruco (1.6±0.7 Ma) y *Ce* San Francisco.

Al sur durante el Pleistoceno medio, el vulcanismo continuó con el volcán Colorado el cual es posteriormente rodeado por el Volcán Encinal (1.4±0.6 Ma) y este último sobreyacido por los volcanes Saucedo y Tierras blancas. En el centro del área de estudio, el volcán la



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Mesa ( $1.5 \pm 0.7$  Ma) es sobreyacido por los conos cineríticos Las Chivas y San Simón que junto a los Cc Higuera I y II, representan el vulcanismo más joven de la zona.

*Aluviales y lacustres Cuaternarios*

En el valle de Ixtlán se identificaron sedimentos lacustres y aluviales asociados al Rio Duero y por tanto su depositación ocurrió durante el último millón de años, a esta unidad se le denominó ALQ. Contemporánea a esta unidad, pero al oriente del área, se observó también un valle con sedimentos Cuaternarios denominado SQ, la diferencia se hace debido a que este depósito es diferente a ALQ, puesto que este último está aislado estructuralmente por la falla Ixtlán.

**V.II.I Estratigrafía Local**

La realización de los sondeos geológicos manuales contemplo dos aspectos: interpretar la geología y estratigrafía del subsuelo y ubicar el nivel freático para comprender cómo funciona el acuífero superficial termal. Se realizaron un total de 14 sondeos geológicos en los cuales se levantaron columnas estratigráficas, su profundidad varió entre los 0.52 y 1.7m hasta interceptar el nivel freático. La ubicación de los sondeos se muestra en la Fig. 38 que además incluye 4 perfiles sobre los cuales se representaron las columnas estratigráficas encontradas en su trayecto para simplificar y correlacionar las unidades encontradas en cada sondeo y representar el comportamiento del acuífero.



# MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

## Localización de Sondeos Geológicos Manuales y perfiles asociados

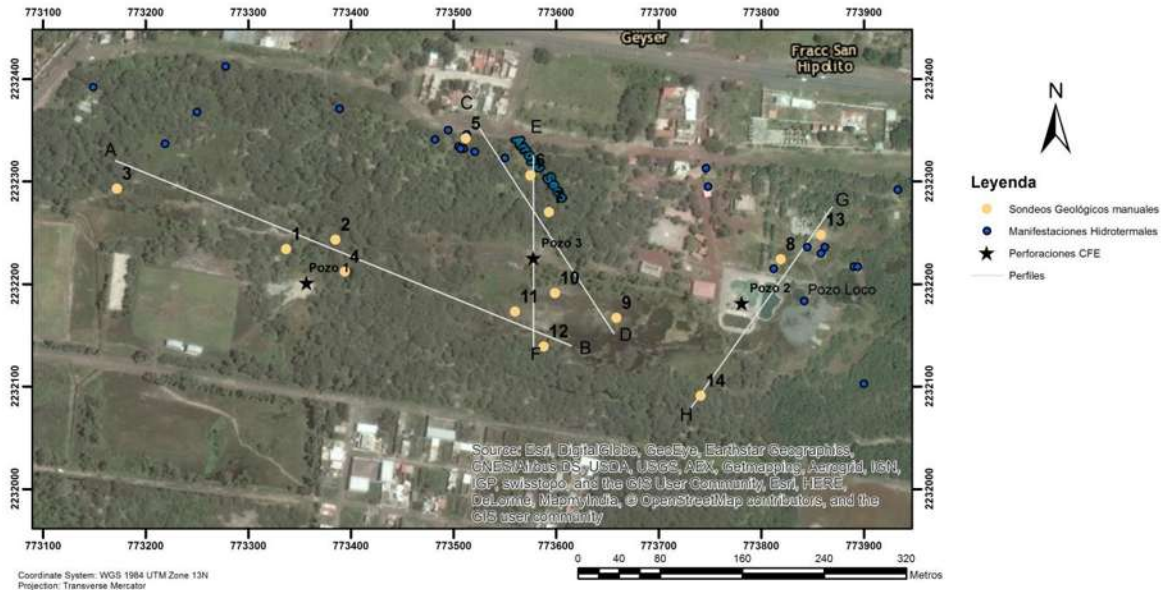


Figura 38. Distribución de los sondeos geológicos (puntos amarillos), manifestaciones hidrotermales (puntos azules), pozos geotérmicos (estrellas) y los 4 perfiles realizados para correlacionar las columnas estratigráficas y el nivel freático.

En las columnas estratigráficas se identificaron en general 3 capas antes de llegar al nivel freático con la siguiente descripción:

- Capa 1 con partículas tamaño arcilla, color café a negro y con saturación de agua; el nivel freático varía en cada sondeo al igual que su composición. Algunas de las capas presentan fragmentos de cerámica en la parte superior o fragmentos de escoria volcánica y escasa materia orgánica.
- Capa 2 limo-arenosa color café a gris, su espesor varió de 30 a 60 cm, contiene pequeños fragmentos de líticos andesíticos y escoria redondeada color naranja. Este estrato se caracteriza por su alto contenido en fragmentos de cerámica y ocasionalmente obsidias talladas (como flechas o cuchillos), también suele presentarse materia orgánica en bajas cantidades.
- Estrato superior correspondiente al suelo actual formado por arenas de color café a gris, fragmentos de roca de tipo andesítico y esporádicos fragmentos de cerámica en la parte basal, el espesor es variable, pero en general es de aproximadamente 80 cm.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Es importante mencionar que la capa 2, dadas sus características en especial su matriz limo-arenosa, el contenido de escoria y la cerámica fragmentada, puede ser indicativa de un lahar histórico, que pudo afectar un asentamiento humano prehispánico.

*Correlación estratigráfica*

En las figuras de la 39 a la 42 se exponen cuatro perfiles donde se representan y correlacionan las columnas estratigráficas obtenidas de los sondeos geológicos considerando la topografía, por lo que también se simboliza el nivel freático (NF). El NF simbolizado corresponde al nivel real puesto que a la altura topográfica (msnm) se le resta el espesor-profundidad a la que se encuentra el nivel del agua, es decir, el espesor del sondeo.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

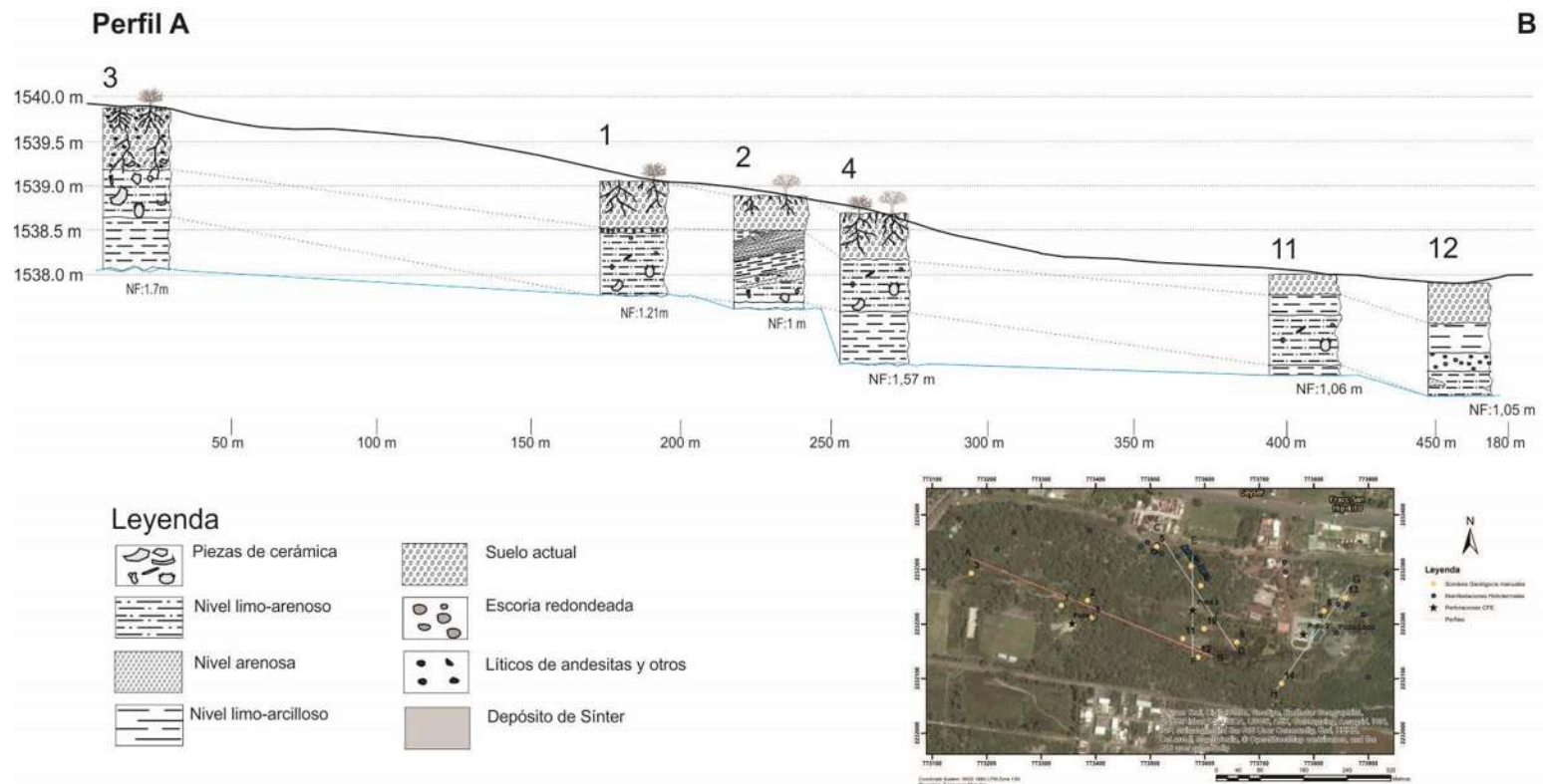


Figura 39. Perfil de dirección NO-SE donde se correlacionan seis columnas estratigráficas que presentan características similares en sus capas. Note que la columna 2 presenta variaciones en la capa 2 pues se observan pequeños estratos intercalados de arena fina a media y arcillas, además de la variación en espesor del suelo. Finalmente se observa como el nivel freático (línea azul) es dependiente de la topografía.

MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

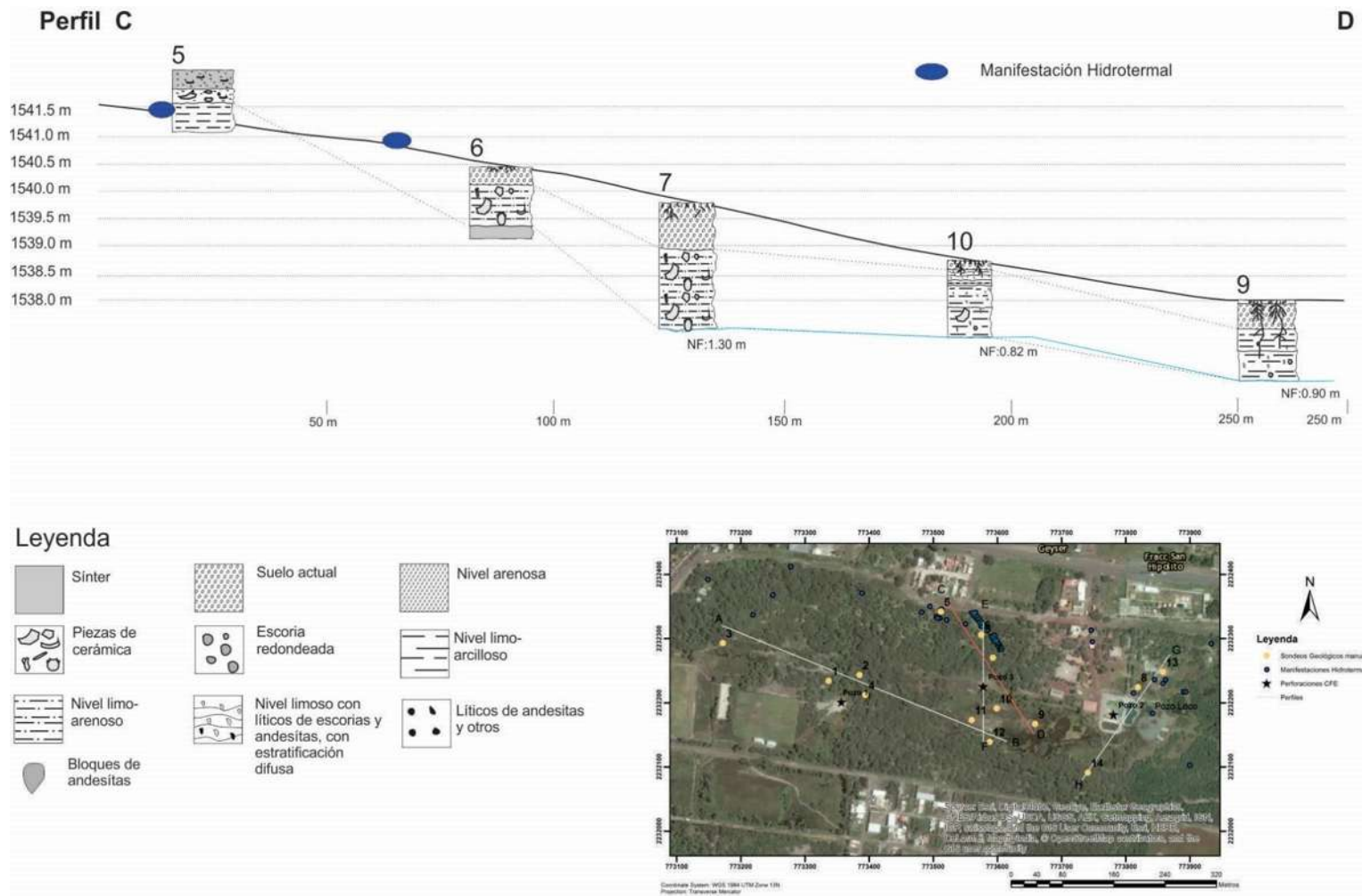


Figura 40. Perfil de dirección NO-SE en el cual se correlacionaron cinco columnas estratigráficas. Note que la columna 5 es muy superficial por lo que no se contempla el nivel freático al igual que la columna 6 donde la aparición de un depósito de sinter trunco el sondeo debido a su dureza. Las columnas 7,9 y 10 fueron correlacionadas, pero con variación en el espesor de sus capas. Finalmente, el nivel freático (línea azul) sigue la topografía de la zona.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

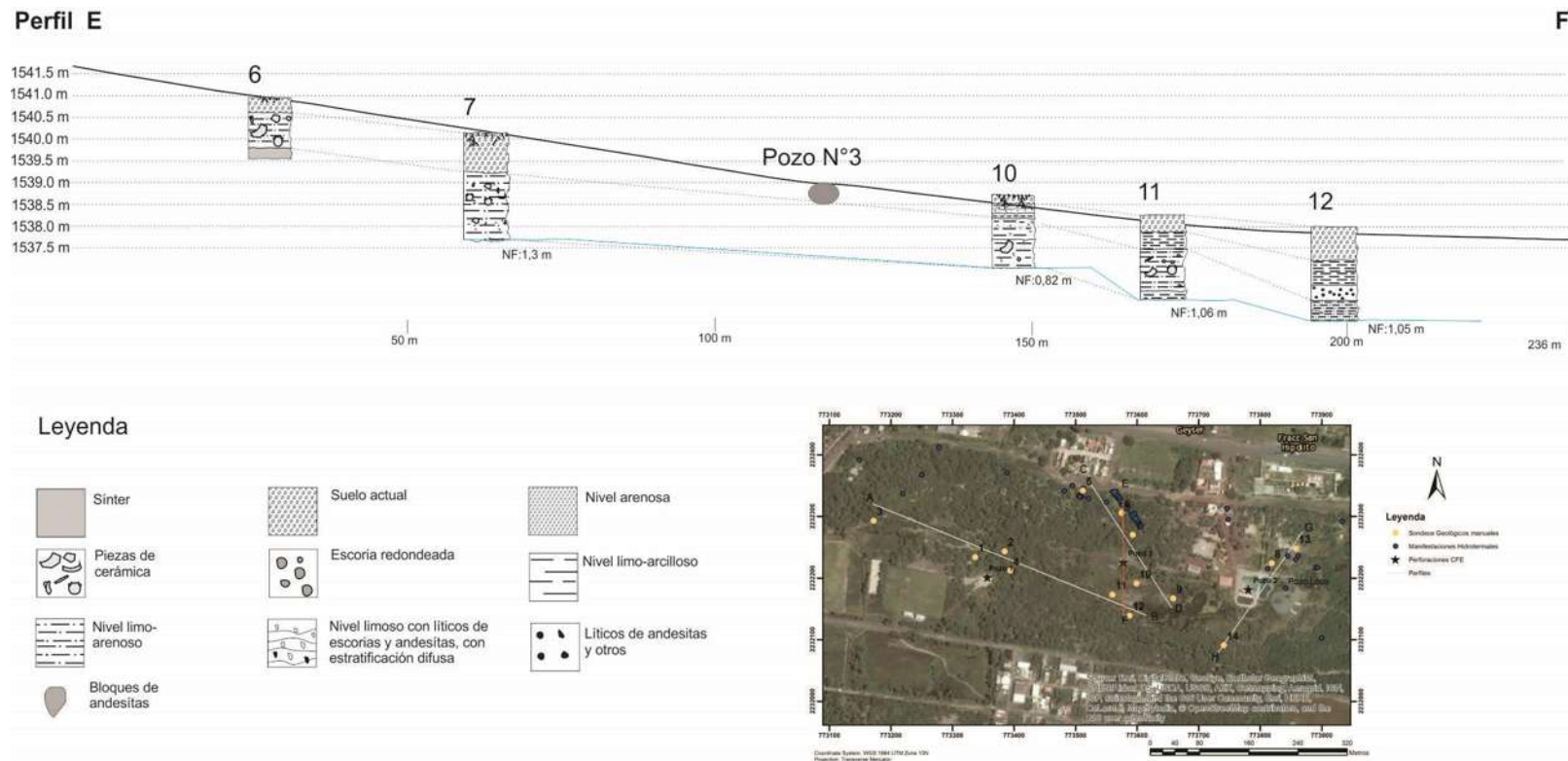


Figura 41. Perfil de dirección N-S donde se correlacionaron 5 columnas estratigráficas y se representa la ubicación del Pozo N°3. Note la diferencia de espesores de las capas y el comportamiento del nivel freático (línea azul) que sigue la topografía.

La columna 6 presenta una capa de sinter el cual es producto de la depositación de sílice disuelta en el agua hidrotermal. Los depósitos de sinter en la zona son sólidos, de color gris, con o sin presencia de poros y frecuentemente con contenido de materia vegetal silicificada (Ver descripción detalla en Olvera-García, 2017).



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

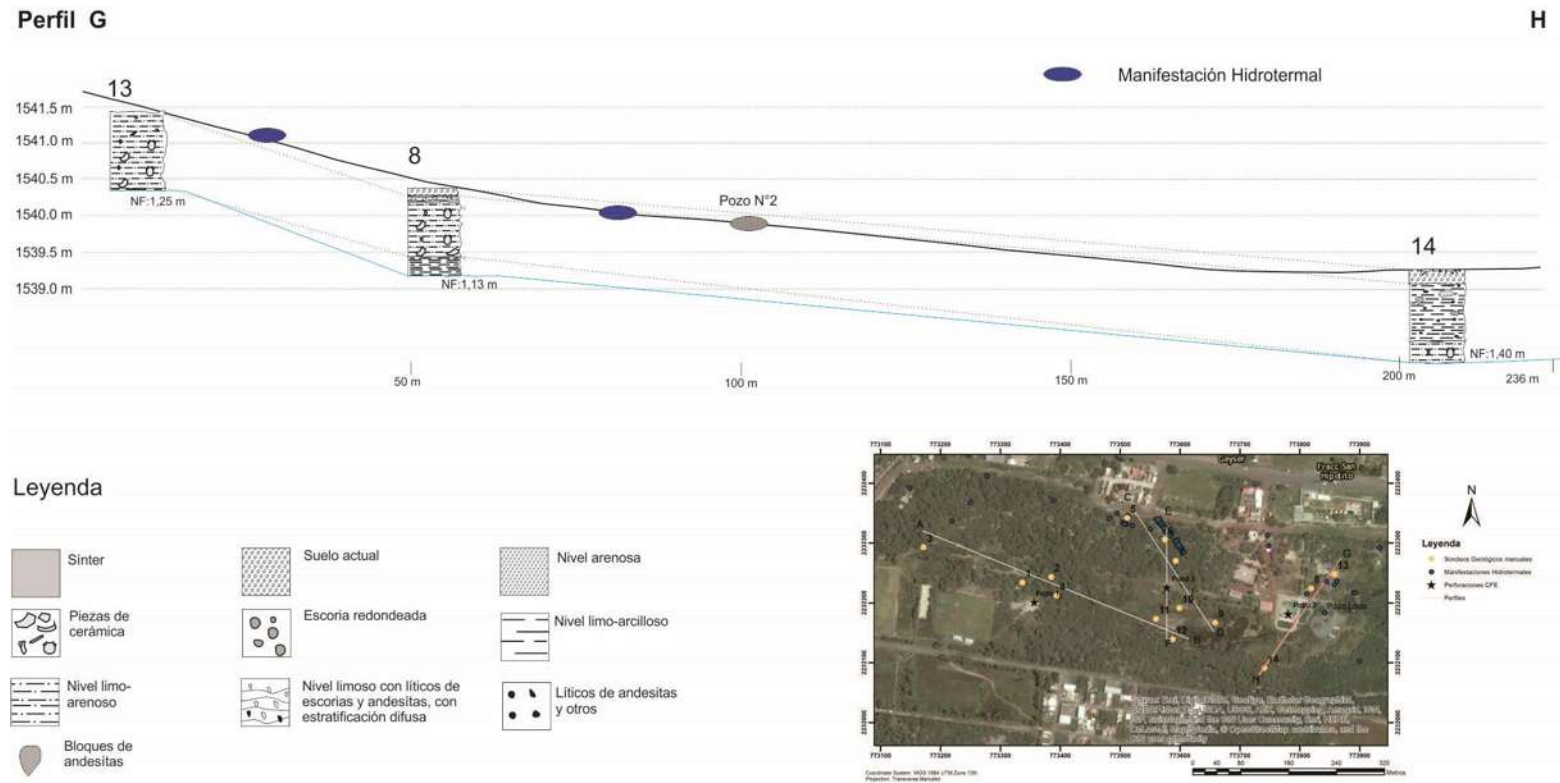


Figura 42. Perfil de dirección NE-SO donde se correlacionan tres columnas estratigráficas y se representa el Pozo N°2, conocido como el géiser de Ixtlán”.  
Obsérvese que existe una buena correlación entre las tres columnas en cuanto a su espesor similar y un nivel freático que sigue la topografía.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

El nivel freático es variable y se localiza aproximadamente a 1.70 metros de profundidad y se comporta conforme a la topografía tal y como se presentan en los perfiles delimitando el acuífero libre o superficial. Asimismo, en esta área, cerca de los pozos N°1 y N° 2 se hallaron abundantes restos de cerámica (Fig. 43).



Figura 43. Fotografías ejemplo de la cerámica encontrada en el área de los pozos N°1 y N° 2.

### **V.III Vulcanología**

Se catalogaron 35 centros volcánicos, que incluyen 14 conos cineríticos y de escoria, 15 volcanes tipo semi-escudo y 6 flujos de lava no asociados a conos distribuidos alrededor de la ZGIH. A continuación, se describen las características principales de estos:

#### *Conos Cineríticos*

Los conos cineríticos representan el vulcanismo tipo estromboliano de la ZGIH; presentan morfología típica de cono y en bancos de material donde fue posible ver su interior se identificó estratificación inclinada en sus flancos y paralela a caótica en la chimenea (Fig. 44). Por tanto, fue posible seguir la secuencia de eventos que les originó, observándose estratos definidos por caídas de escoria de tamaño bloque a ceniza gruesa de composición andesítico basáltica a andesítica y corrientes de densidad piroclástica diluida que se



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

correlacionan con eventos hidromagmáticos (Fig. 45). Asimismo, esta secuencia de eventos evidencia que la evolución del cono fue en un corto periodo de tiempo dado que no se identificaron paleosuelos.



Figura 44. Cono cinerítico Las Chivas; gracias al corte para extracción de material fue posible observar la disposición de los estratos asociados a los eventos que le generaron. Las líneas amarillas son guías para demarcar la continuidad de algunos estratos; obsérvese que la deposición del material estuvo controlada por la pendiente.



Figura 45. Las líneas amarillas enmarcan un depósito de corriente de densidad piroclástica diluida (CDPd), parte de la evolución del Cono Cinerítico Las Chivas.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

*Cono de escoria*

Estos edificios corresponden a conos en donde no se observó estratificación, incluso en cortes en bancos de material. Sus componentes constan de depósitos de escorias, diques, incluso lavas asociadas como en el caso de los conos de escoria Coruco y San Francisco. En el contexto regional, se observaron lineamientos NO-SE de los conos de escoria, pero en la zona de estudio el único evidente es el definido por cinco conos entre ellos Las Cuevas y Trompeta, sugiriendo la existencia de un sistema de fracturas eruptivas y o diques NO-SE, no obstante, en este lineamiento reconocido en la zona de estudio se identificaron diques con orientación N70E/86NO y N50/84SW, que pueden ser indicativos de la actividad de otros sistema de fracturas eruptivas que responden a un tensor de esfuerzos diferente (Fig. 46).

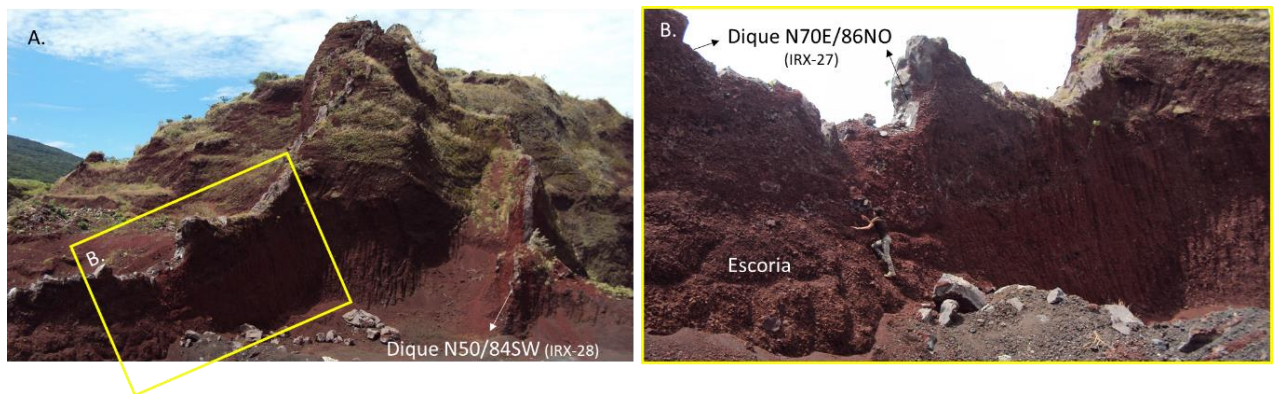


Figura 46. Imágenes de uno de los conos de escoria parte del lineamiento NO-SE Las Chivas-Trompeta. El recuadro amarillo es una ampliación (B). Obsérvese la dirección de los diques, indicativa de otros sistemas de fracturas eruptivas, puesto que no concuerdan con el principal NO-SE.

*Volcanes Semi-escudo*

Estos volcanes tienen una tasa efusiva y volumen de lava emitido mayor que los anteriores, su morfología es suave y configura una geoforma en semi-escudo, presentando una relativa simplicidad estratigráfica definida exclusivamente por flujos de lava con brechas hacia la base (Fig. 47 y 48). Lo anterior resultando indicativo de erupciones efusivas tipo hawaiano que ocurrieron en cortos periodos de tiempo. La petrografía de las lavas asociadas presenta texturas traquítica a pilotaxítica definidas por plagioclasas que demarcan el carácter fluido de las lavas, las cuales son de composición andesítico basáltica a andesítica con minerales

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

accesorios como ortopiroxeno y clinopiroxeno, pero con dominancia del olivino, el cual usualmente presenta bordes de reacción de iddingsita (Ver Anexos petrografía).



Figura 47. Eventos efusivos de construcción de volcanes semi-escudo. **A.** Volcán Colorado, **B.** Volcán Sombrero.

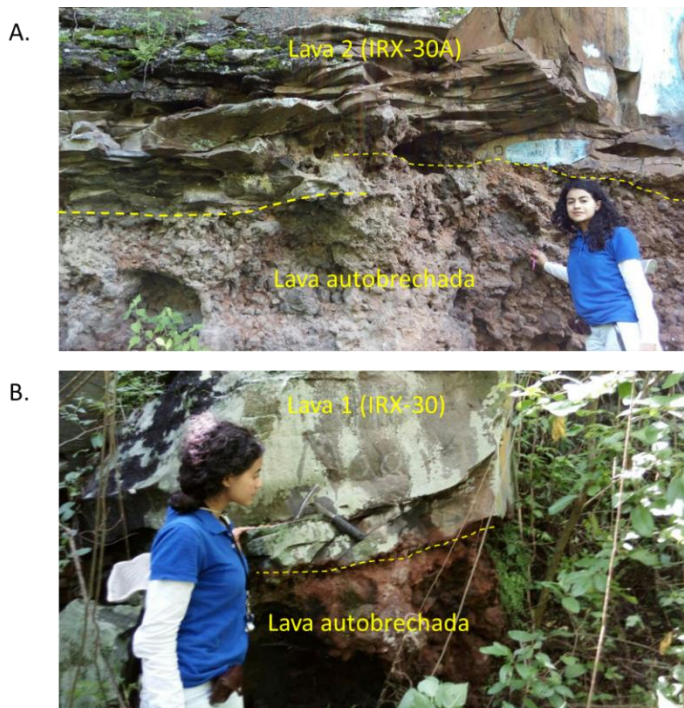


Figura 48. Fotografías del lado oriental de la Barranca del Cerezo, sector conocido como “La Virgen” (Trazo de la Falla Nogales) donde es posible observar la brecha eruptiva del volcán Nogales.

**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

*Lavas*

También en el área se identificaron flujos de lavas no asociados a conos, de composición andesítico basáltica a andesítica cubriendo grandes extensiones, pero con menor espesor (Fig. 49); estos podrían ser una variante geomorfológica de los anteriores, por lo tanto, implica que la fluidez de estas lavas es mayor respecto a la que originó los volcanes semi-escudo y por ende cubrió mayores extensiones.



Figura 49. Lava Gigante sobre la carretera.

La variabilidad geomorfológica del vulcanismo en la ZGIH resulta indicativa de diferentes factores que controlaron la viscosidad de los magmas, como podría ser el contenido de volátiles y la interacción de las lavas con el acuífero superficial asociado al paleolago de Chapala. No obstante, es evidente que prevalece un vulcanismo efusivo, el cual se ha de relacionar con la intensa extensión en el área que permitió el ascenso de mayores volúmenes de lava en comparación con otros sectores de CVMG y a la convergencia de diferentes sistemas de fallamiento a nivel regional como el del graben de Penjamillo (N-S), graben de Cotija (NW-SE), fallamiento del CVTM (NE-SO y ESE-WNW) y el del *rift* de Chapala (E-W).

MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

V.III.I Geoquímica

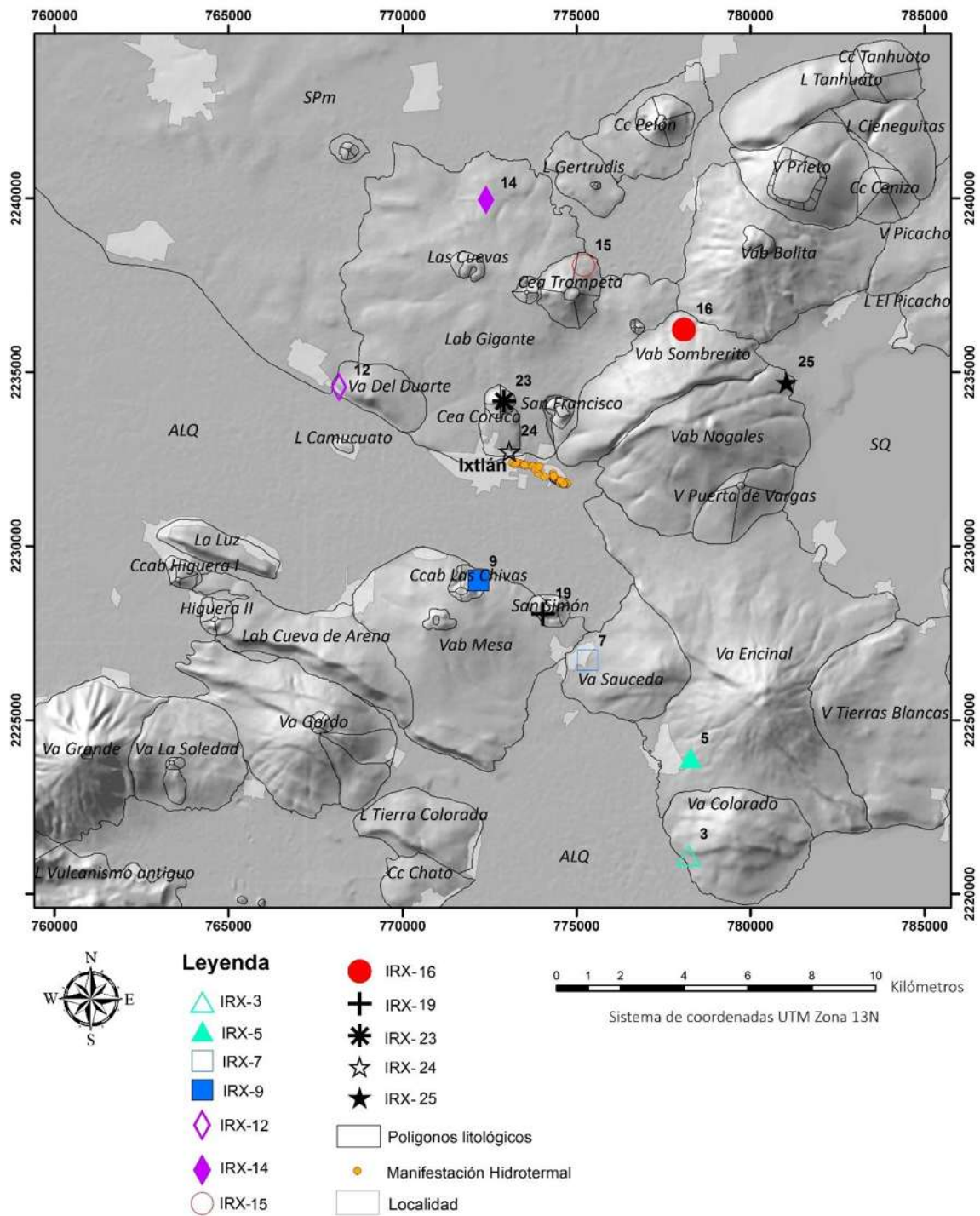


Figura 50. Localización de las muestras seleccionadas para análisis geoquímico.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

La Fig. 50 es el mapa de localización de las muestras con análisis geoquímico. La Fig. 51 corresponde al diagrama TAS (Álcalis vs Sílice) propuesto por Le Bas *et al.*, (1986), que muestra la clasificación química del vulcanismo de la zona de estudio que corresponde principalmente a andesitas basálticas y andesitas, pudiendo diferenciarse hasta dacitas como fue en el caso del derrame de lava del Cono de escoria Coruco. La Fig. 52, muestra la línea discriminante de Irvine y Baragar (1971) en donde se puede observar que todo el vulcanismo de la zona pertenece a la serie magmática subalcalina.

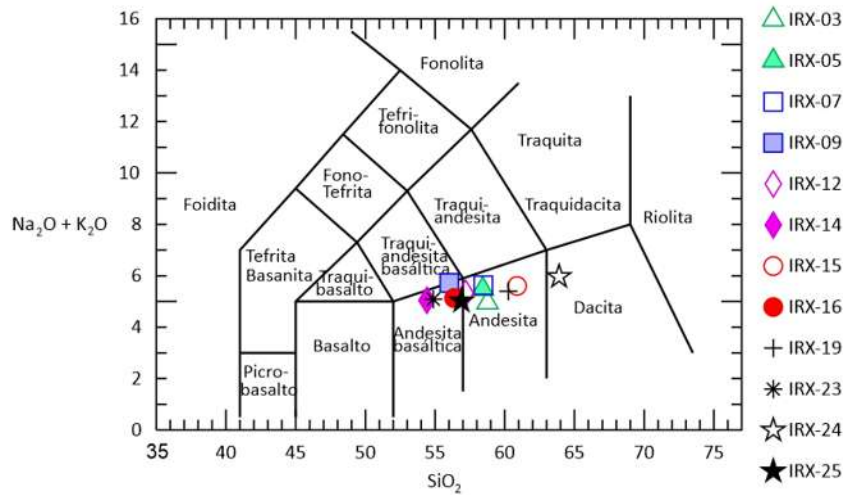


Figura 51. Diagrama TAS (Na<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub>) propuesto por Le Bas *et al.*, (1986), el vulcanismo químicamente corresponde a andesitas-basálticas y andesitas principalmente.

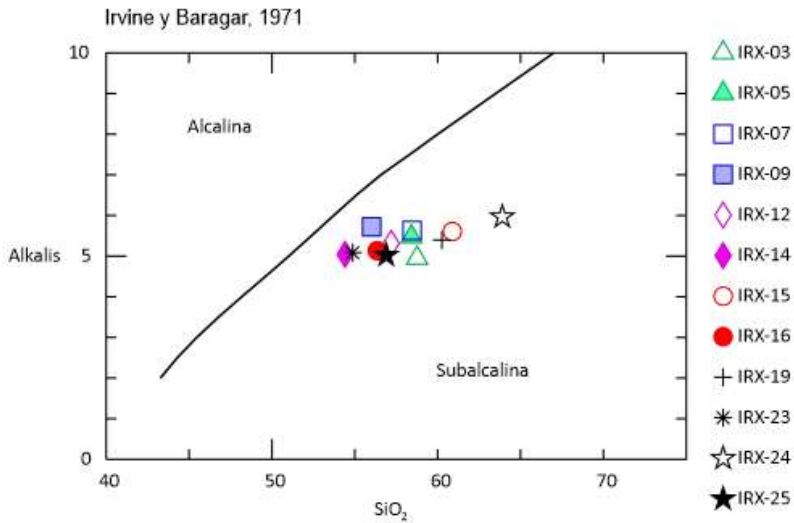


Figura 52. Línea discriminante de Irvine y Baragar (1971), ubica el vulcanismo dentro del dominio subalcalino.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

La Fig. 53 muestra el diagrama ( $K_2O$  vs  $SiO_2$ ) propuesto por Peccerillo y Taylor (1976), que subdivide el dominio subcalcalino; muestra al Cono cinerítico Las Chivas (IRX-9) con mayor enriquecimiento en Potasio, en comparación con las otras muestras. Los conos de escoria que definen la fractura eruptiva NO-SE en la zona con su representante La Trompeta (IRX-15) podrían ser más diferenciados que los conos y derrames de lava como San Francisco y Coruco (IRX-23), sin embargo, sus lavas son ácidas (IRX-24 lava del Coruco). En general, el vulcanismo de la zona pertenece a la serie calco-alkalina asociada a zonas de subducción, pero con un ligero enriquecimiento en potasio.

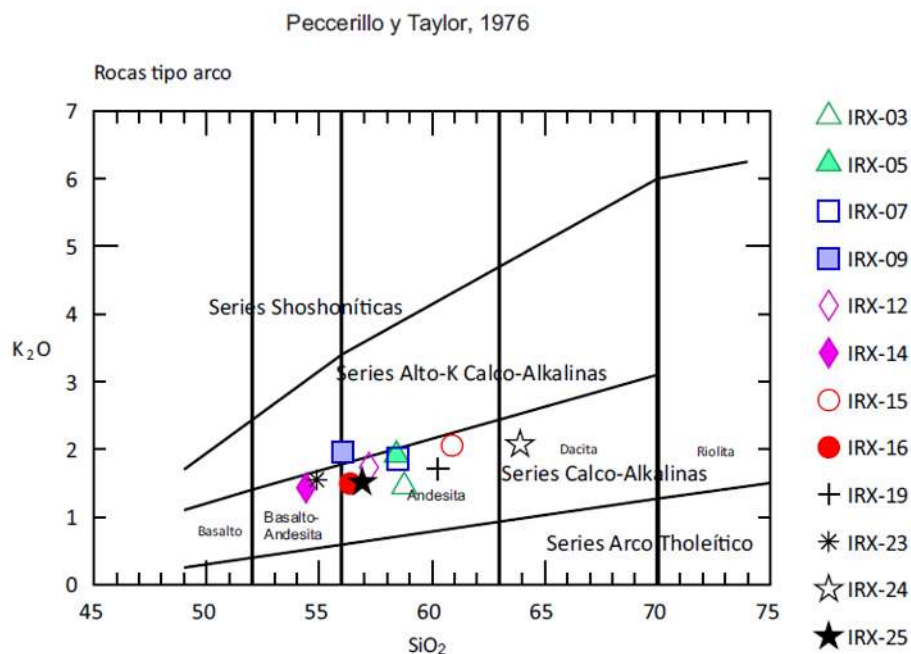


Figura 53. Diagrama ( $K_2O$  vs  $SiO_2$ ) propuesto por Peccerillo y Taylor (1976), mostrando que el vulcanismo pertenece a la serie calco-alkalina.

La Fig. 54, muestra el diagrama triangular AFM (Álcalis, Hierro total y Magnesio) de Irvine y Baragar (1971), que permite distinguir entre los trenes de diferenciación toleítico y calco-alkalino en las series de magma subcalcalino. Se observa que el vulcanismo de la zona es calco-alkalino.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

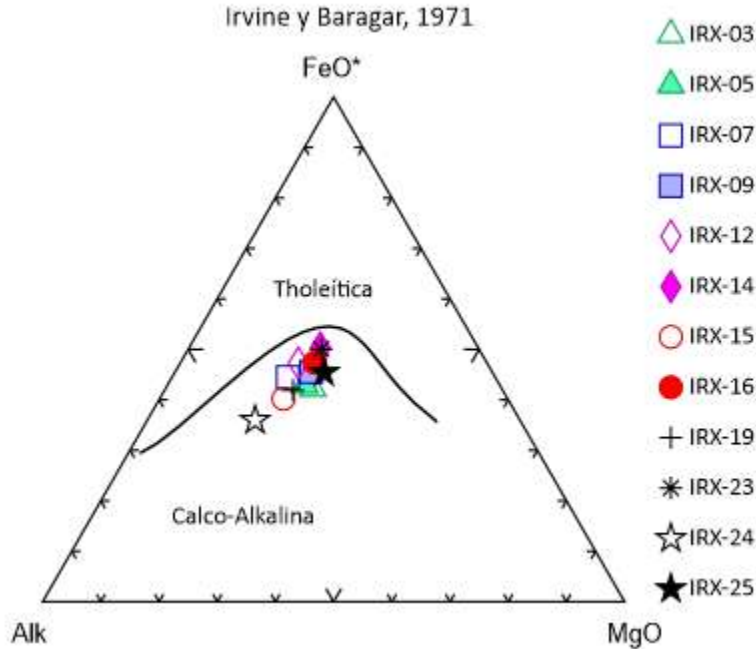


Figura 54. Diagrama triangular AFM (Álcalis, Hierro total y Magnesio) de Irvine y Baragar (1971), muestra que el vulcanismo es calco-alkalino.

Para el análisis de los elementos traza la Fig. 55. muestra el diagrama de tierras raras normalizado al condrito propuesto por Sun y McDonought (1989), donde en general los espectros tienen la misma forma, con valores ligeramente mayores en las tierras raras ligeras (LREE siglas en inglés, La-Sm), es probable que este patrón indique que la fuente de la que se derivó el magma que da origen al vulcanismo del Valle de Ixtlán presente granates que atraparón a las tierras raras pesadas (HREE siglas en inglés, Gd-Lu) causado que estas lavas tengan mayor concentración de LREE con respecto a los HREE.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

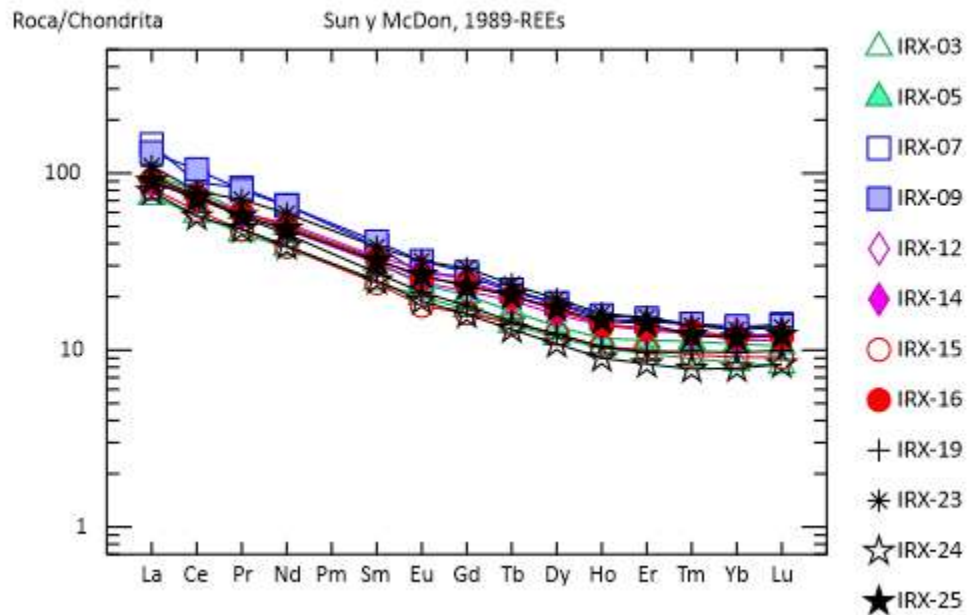


Figura 55. Diagrama de tierras raras (REE) normalizado al Condrito (Sun y McDonough, 1989).

El diagrama de multielementos normalizado al manto primitivo de Sun y McDonough, (1989)(Fig. 56), muestra gran variación en cuanto al Cesio (Cs), puesto que este elemento posee un radio iónico grande que hace que sea excluido de la estructura de los minerales ferromagnesianos como el olivino y piroxeno, característicos de la lavas del Valle de Ixtlán; por ejemplo la IRX-16 es la más empobrecida en este elemento ello se explica dado que la cantidad modal de olivino en la muestra es casi del 40%.

En general se observó una anomalía positiva en Bario (Ba) que se hace más fuerte en la muestra de lava del Cono El Coruco (IRX-24) en este caso, se explica dado el carácter incompatible del Ba que al ser un elemento de baja carga (*large ion lithophile (LIL)*) tiende a concentrarse en la fase líquida, por ello en flujos de lava tardíos como el caso de IRX-24 tiende a concentrarse; de igual manera, el Plomo (Pb), presenta una anomalía positiva, la cual es más notoria en la muestra del Volcán La Sauceda (IRX-7), dicho comportamiento también se atribuye al hecho de ser un LIL. Cabe mencionar, que en todas las muestras se observó una anomalía negativa en Niobio (Nb), la cual ha sido asociada a la firma geoquímica de zonas de subducción.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

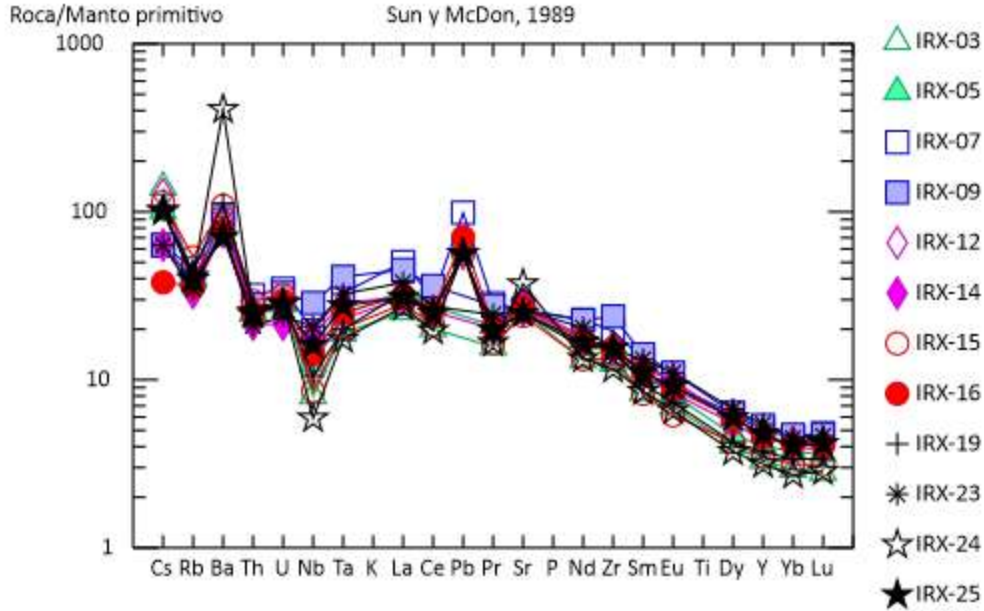


Figura 56. Diagrama multielementos normalizado a manto primitivo, valores de normalización según Sun y McDonough, (1989).

**V.III.II Geocronología**

Posterior al proceso descrito en la metodología, fue graficado el contenido de Argón contra la edad tentativa de la muestra de roca (Anexo 3); identificándose la edad central y el error del resultado (Tabla 5).

Muestra	Vab Mesa (cima) (IRX-34)	Vab Mesa (base) (IRX-31)	Vab Nogales (IRX-25)	Cea Coruco (IRX-24)	Va Encinal (IRX-20)	Cea Trompeta (IRX-15)	Lab Gigante (IRX-14)
<b>Edad (Ma)</b>	1.5±0.7	1.5±0.8	3.1±0.9	1.6±0.7	1.4±0.6	1.8±0.9	1.9±0.7

Tabla 5. La tabla muestra las edades calculadas a través del método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , para cada muestra.

Para identificar el rango en el que el vulcanismo del área de Ixtlán se desarrolló, el siguiente un diagrama de bigotes que muestra la distribución temporal de los edificios fechados y permitió identificar que el vulcanismo de la ZGIH se desarrolló entre 2.2 y 1.2 Ma principalmente (Fig. 57). Asimismo, se sobre impuso el fallamiento que afecta a los edificios volcánicos con el objetivo de identificar esa actividad tectónica en el tiempo.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

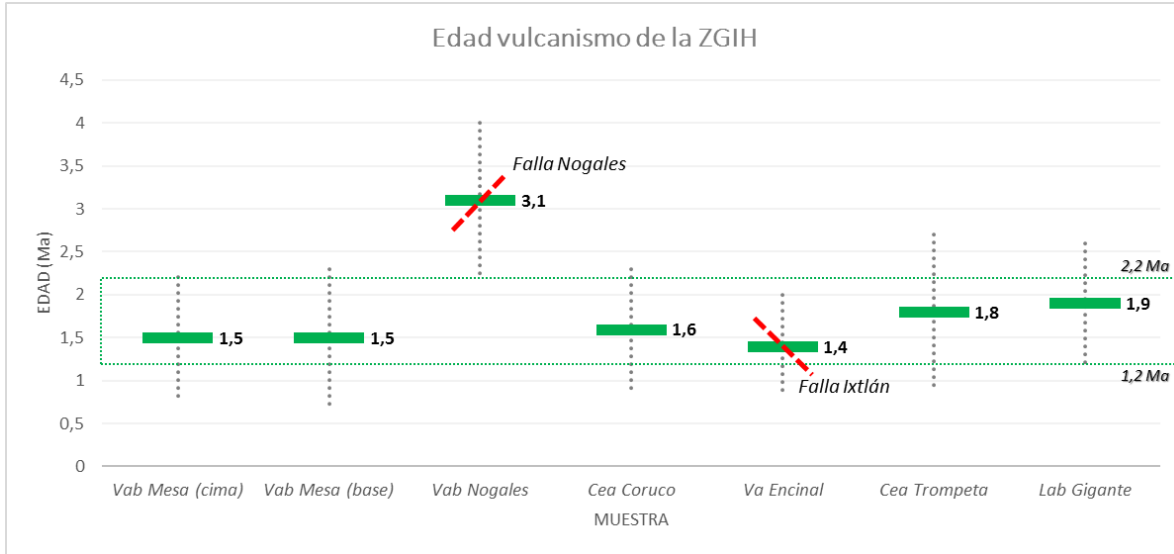


Figura 57. Diagrama de bigotes y cajas donde se ilustra la concentración de la actividad volcánica de Ixtlán (en verde), asimismo las líneas rojas punteadas corresponden al fallamiento sobreimpuesto a dicho edificio volcánico.

#### V.IV Geología Estructural

Desde el punto de vista estructural la ZGIH se caracteriza por poseer tres sistemas de fallas normales con componentes laterales izquierdas: NO-SE, NE-SO y *ENE-OSO* (Fig. 58). No obstante, dado el contexto regional se esperaría observar el tren regional E-O del Mioceno tardío del Graben de Chapala, pero este está oculto posiblemente bajo los sedimentos (ALQ) del valle de Ixtlán y por los edificios volcánicos. A continuación, se enlistan los principales rasgos de cada sistema y las fallas principales que estos poseen.





**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

*Sistema de fallas NO-SE/SO*

Este sistema de fallas domina en el sector centro y SO de la zona de estudio y dado que afecta al volcán Encinal es posterior a  $1.4 \pm 0.6$  Ma; asociado a este sistema se observó un lineamiento de conos de escoria indicando que estas fallas también controlaron parte de la actividad volcánica. Dentro del contexto regional este sistema se extiende hacia el occidente del CVTM y a nivel local las fallas principales parte de este sistema son la falla Ixtlán y la falla Mezquite.

*Falla Ixtlán N160/ 80SO*

La falla Ixtlán tiene una dirección NO-SE y se divide en dos; el primer tramo (NO) presenta 20 km de longitud, exhuma sedimentos de edad Plioceno medio (*SPm*), tiene un salto de falla de 15 m y corta un derrame de lava de  $1.9 \pm 0.7$  Ma. El segundo tramo (SE) presenta 12.3 km, 60 m de salto de fallas y afecta al volcán Encinal de  $1.4 \pm 0.6$  Ma. Los dos tramos se distancian por 3.6 km, en una zona de depositación lacustre, pero se vinculan gracias a un lineamiento de manifestaciones hidrotermales superficiales de 1.7 km, asimismo la diferencia entre sus saltos de fallas se relación a la posible variación del relleno sedimentario en estos sectores. Gracias al trabajo de campo se observó que esta falla no solo es normal, sino que posee una componente lateral izquierda y partir de los datos de estrías fue calculado su campo de esfuerzos (Fig. 59).



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

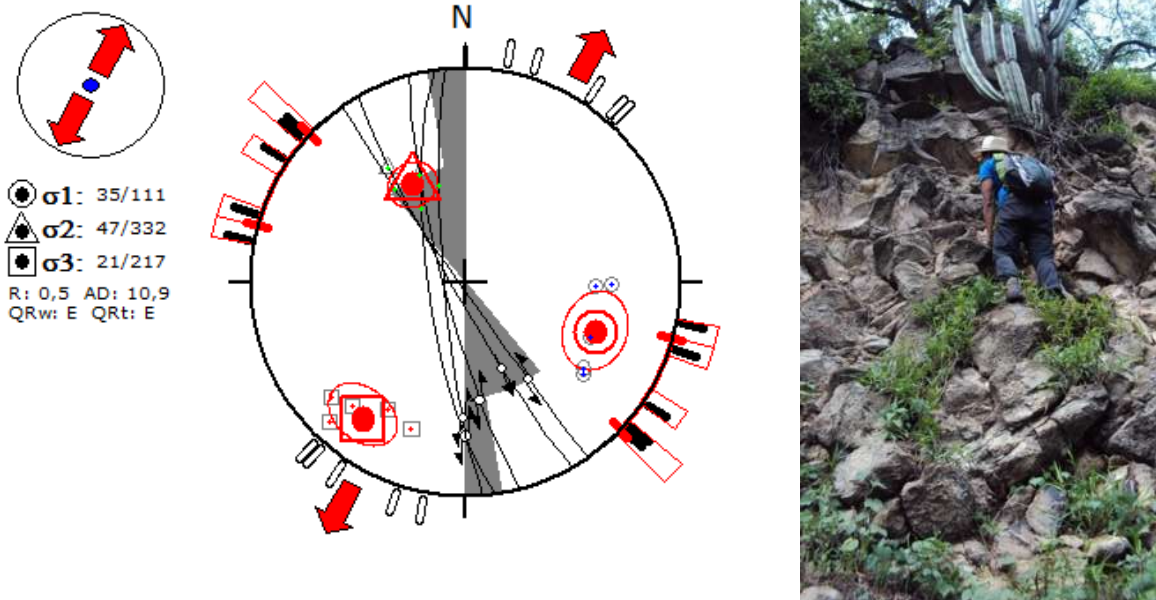


Figura 59. Campo de esfuerzos calculado para la Falla Ixtlán y fotografía de campo. Obsérvese la componente lateral izquierda de la falla, no obstante, su principal movimiento es normal.

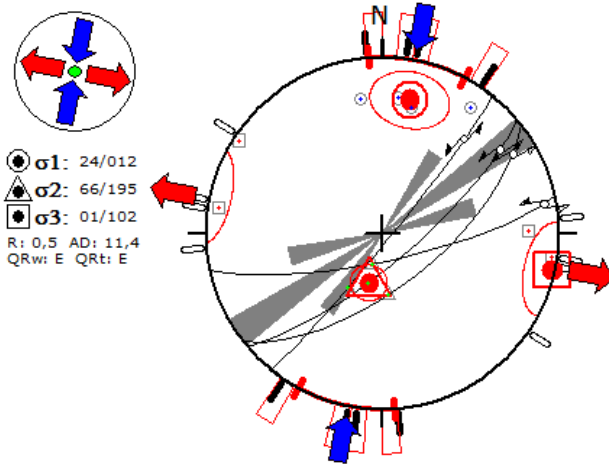
### Sistema de fallas NE-SO

Este sistema de fallas se localiza únicamente en el sector oriental de la zona de estudio y consta de dos grandes fallas; la falla Nogales de orientación N65E/75SE que afecta al volcán Sombrero y origina al volcán Nogales ( $3.1 \pm 0.9$  Ma) y otra hacia el sur de la zona con orientación ENE-OSO que afecta al volcán Encinal ( $1.4 \pm 0.6$  Ma) en su sector sur.

### Falla Nogales N65E/75SE

La falla Nogales mide unos 15 km de longitud, presenta saltos a nivel regional *en echelon* y afecta una serie de volcanes con orientación NNE-SSO. Gracias a las evidencias de campo se observó que contó con dos fases de deformación, una con una componente lateral izquierda (Fase I, Fig. 60A) y posteriormente otra más normal (Fase II, Fig. 60B); asimismo se calculó su tensor de esfuerzos en sus dos fases (Fig. 60). Esta falla es casi perpendicular a la falla Ixtlán y es el límite de las manifestaciones termales al SO.

Falla Nogales Fase I (A.)



Falla Nogales Fase II (B.)

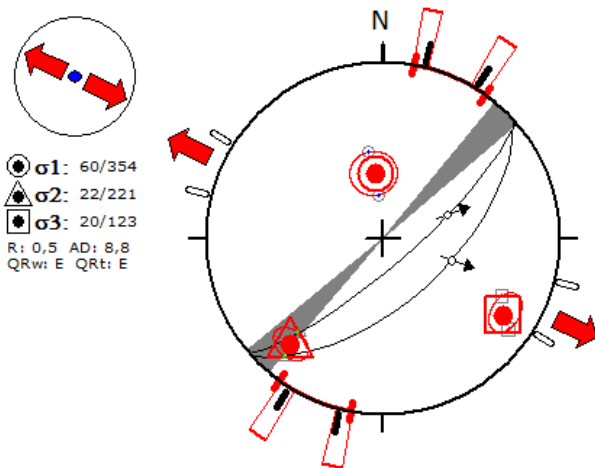


Figura 60. Campo de esfuerzos calculado para la Falla Nogales en sus dos fases de deformación. **A.** Fase I: presenta una componente lateral izquierda. **B.** Fase II: más normal. La fotografía muestra como las estrías negras de la fase II se superponen.

*Sistema de ENE-OSO*

Realmente este sistema es únicamente observable al SO de la zona y es la estructura que corta al volcán Grande, denominada Falla Pajacuarán. Esta falla forma parte del sistema E-O del actual punto triple, es decir el graben de Cítala.

## MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

El mapa de la Figura 61, corresponde a un resumen de lo desglosado en este apartado; observándose que la falla Ixtlán y la falla Nogales configuran un escenario de intersección de fallas y localmente la falla Ixtlán una zona de relevo, demarcada por las manifestaciones hidrotermales. Asimismo, es de aclarar que por lo evidenciado anteriormente tanto la falla Ixtlán como la Nogales presentan componentes laterales izquierdas y que cada una tiene su propio tensor de esfuerzos.

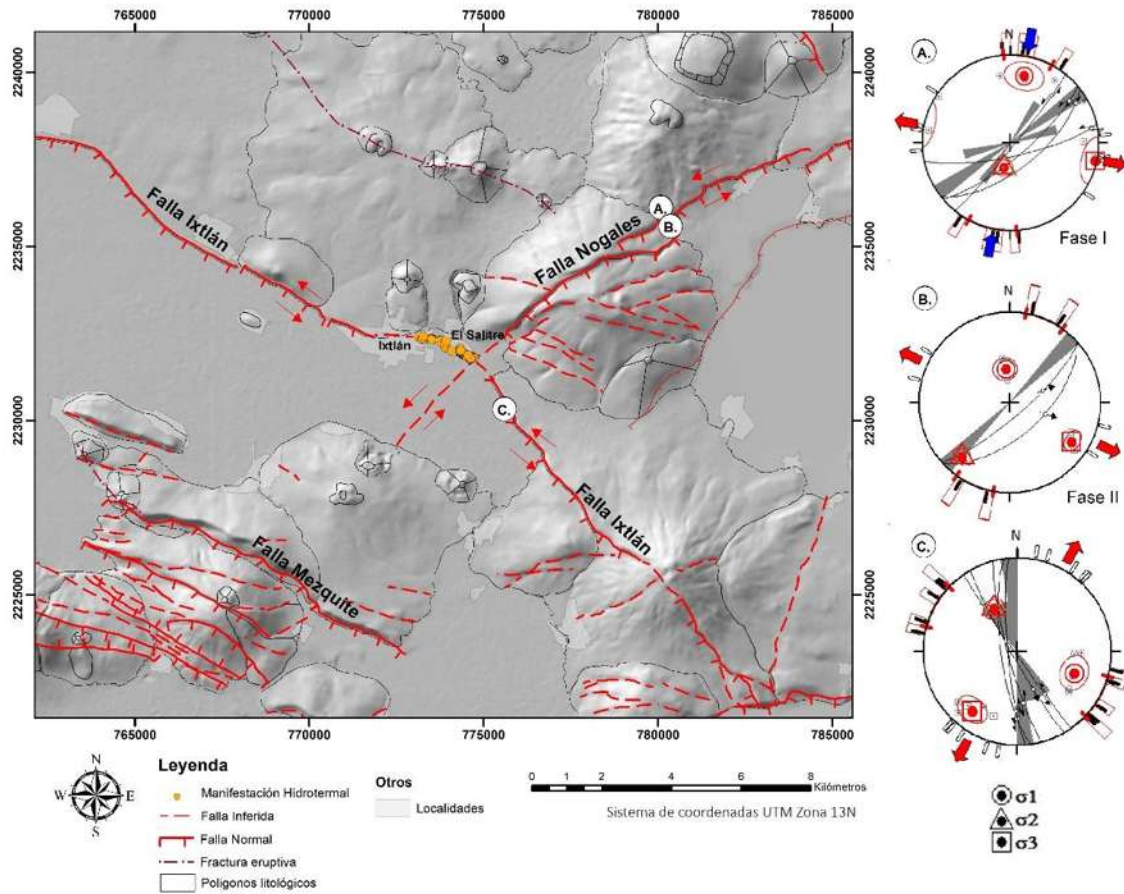


Figura 61. Mapa estructural de la ZGIH con los diagramas y tensores de esfuerzo (derecha) y movimiento relativo de las fallas, que configuran un escenario estructural de intersección y a nivel local la falla Ixtlán una zona de relevo demarcada por las manifestaciones hidrotermales.

### V.IV.I Distribución de Manifestaciones Hidrotermales

En la ZGIH se ha contabilizado un total de 160 manifestaciones hidrotermales con temperaturas entre 35 y 92° C. No obstante, existe la posibilidad que este número sea mayor dado que pueden estar localizadas en el interior de las casas y predios del poblado



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

El Salitre, donde se tiene un mayor registro. La Tabla 6. Muestra un resumen de las manifestaciones hidrotermales más relevantes por su tamaño o bien por su temperatura y una breve descripción de sus características.

X	Y	Temp. °C	Observaciones
774406	2231902	43	Manifestación a nivel del suelo, aparente cráter de explosión, sin flujo de agua, no presenta ni sinter, ni vapor y con dos metros de diámetro.
774428	2231889	48	Manifestación a nivel del suelo, cráter de explosión, sin flujo de agua, sin depósito de sinter, gas dominante y con 30 cm de diámetro.
774435	2231880	48	Manifestación a nivel del suelo, cráter de explosión, sin flujo de agua, con sinter y de 3 metros de diámetro
774484	2231904	90	Manifestación a nivel del suelo, intermitente, con pequeña capa de sinter (2cm de espesor) y sin flujo de agua. Con dirección N110.
774574	2231850	88	Manifestación a nivel del suelo, con flujo de agua, sinter y 40 cm de diámetro.
774584	2231848	89	Manifestación a nivel del suelo, intermitente, sin flujo de agua y con sinter.
774607	2231844	92	Manifestación a nivel del suelo, gas dominante, agua hirviendo, sin flujo de agua y sin sinter
774610	2231810	75	Manifestación hidrotermal a nivel del suelo, con flujo de agua, líquido dominante y con gran desarrollo de sinter. Posible cráter de explosión, presenta una fractura con dirección N340, posible influencia tectónica reciente y con 4,9 metros de diámetro.
774647	2231846	88	Manifestación a nivel del suelo, sin flujo agua, gas dominante y con sinter.
774651	2231833	88	Manifestación a nivel del suelo, sin flujo agua, gas dominante, intermitente y con poco sinter.
774728	2231792	90	Manifestación a profundidad mayor a 1m, sin flujo de agua, gas dominante y sin sinter
773845	2232183	75	Manifestación hidrotermal con agua clara, tonalidad verde por profundidad, vapor y burbujeo intermitente en cierto sector, sin olor. Presenta una relación directa con la perforación 2 o "Géiser de Ixtlán", dado que su erupción afecta el nivel de agua de esta manifestación al disminuirlo.
774342	2232030	86	Manifestación hidrotermal, producto de la explosión hidrotermal del 12 de enero de 2016, con comportamiento intermitente estilo géiser, se clasificó como volcán de lodo.

Tabla 6. Resumen de las manifestaciones hidrotermales más relevantes por su tamaño como por su temperatura y una breve descripción de sus características.

La distribución espacial de esta actividad hidrotermal superficial, muestra una tendencia general NO-SE que concuerda con el rumbo de la Falla Ixtlán; asimismo la totalidad de manantiales calientes, pequeños géiseres, fumarolas y volcanes de lodo, esta al occidente de la Falla Nogales (Fig. 62), pero con una concentración de manifestaciones en el poblado El Salitre donde también se registraron las mayores temperaturas y presentan depósitos hidrotermales tipo sinter (Fig. 63).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

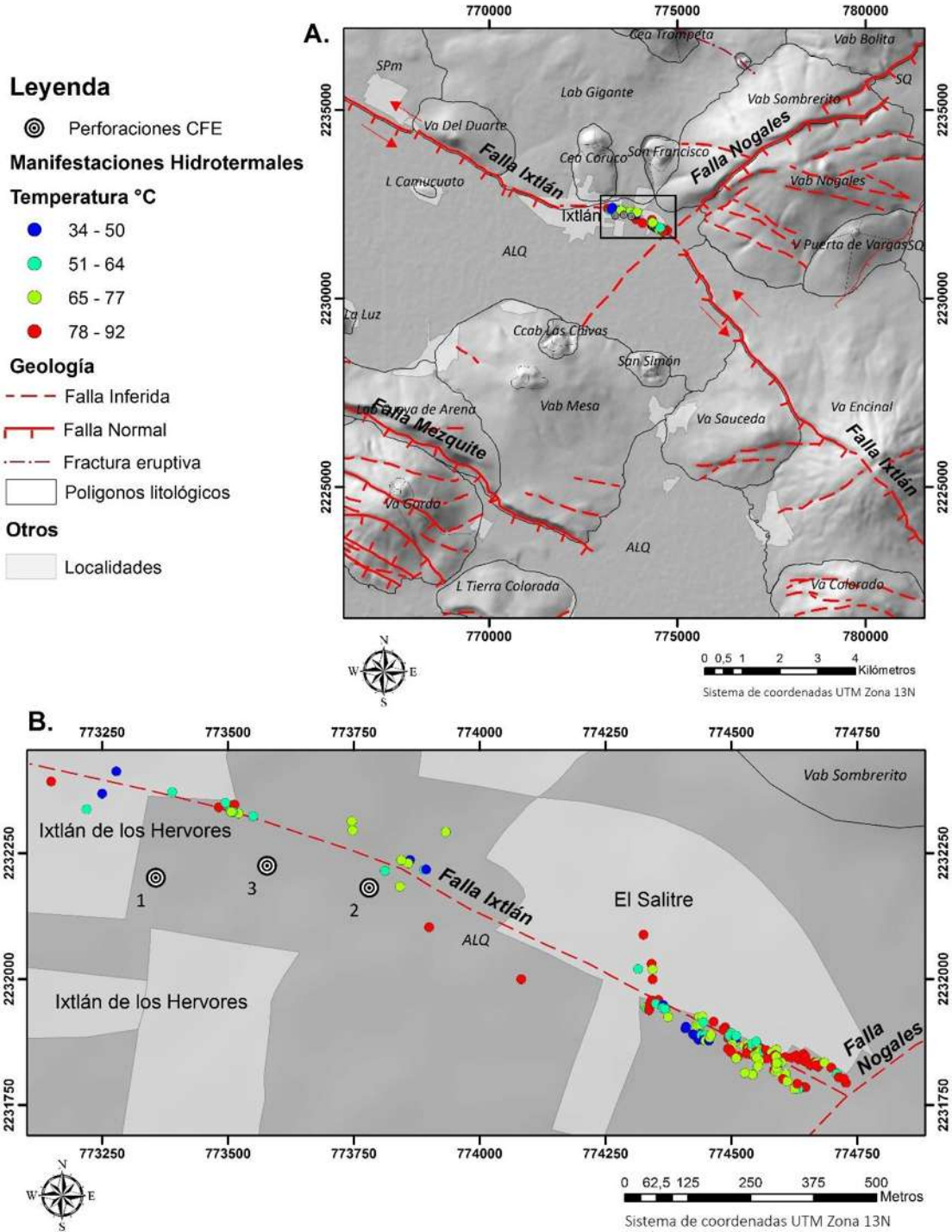


Figura 62. Relación entre las principales estructuras y la distribución de manifestaciones de la ZGIH. **A.** Mapa estructural de la ZGIH; el recuadro negro corresponde a la concentración de manifestaciones hidrotermales.

**B.** Ampliación de la zona de actividad hidrotermal de la ZGIH; obsérvese la tendencia NO-SE en la distribución de manifestaciones hidrotermales que se localizan exclusivamente al occidente de la Falla Nogales.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO



Figura 63. Imágenes de las manifestaciones hidrotermales presentes en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores; obsérvese que la imagen central muestra una manifestación con depósitos de sinter.

### Reporte de erupción hidrotermal

El día 12 de enero de 2016, emergió una manifestación hidrotermal tipo volcán de lodo que arrojó inicialmente lodo y agua, con episodios de actividad de tipo géiser intermitentes



según lo comentado por la población de El Salitre (Fig. 64), la localización de esta nueva manifestación hidrotermal corresponde a las coordenadas *UTM* X: 774342 y Y: 2232030, continuando sobre la franja de tendencia NO-SE, en donde se ha desarrollado la actividad hidrotermal en esta zona geotérmica. La temperatura medida el 24 de enero de 2016 fue de 86°C. Un factor interesante es que este volcán de lodo emergió en un terreno que próximamente se pavimentará y antes del evento de génesis hubo una excavación superficial.

Figura 64. Imagen del volcán de lodo emergido el día 12 de enero de 2016. Obsérvese el flujo de lodo emitido por la manifestación, localizada sobre una calle del poblado El Salitre que se pretende pavimentar. Las rocas sobre la manifestación fueron colocadas por pobladores dado que el lodo que remanece en su interior para el 24 de enero del mismo año presentaba una temperatura de 86°C. La escala en la imagen mide 20 centímetros de longitud.

MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

V.V Magnetometría

Dentro de este trabajo fue usada la magnetometría como una técnica exploratoria complementaria, para afinar el modelo conceptual de la ZGIH. La Fig. 65 presenta los valores de Campo magnético, sobrepuestos al modelo de elevación de terreno de INEGI, después de la aplicación del filtro Reducción a Polo (CTRP) con el *software Oasis-Montaj™*. En este mapa los valores de Campo Total fueron también corregidos por variación diurna, eliminando la influencia asociada a la ionosfera y confirmando la existencia de las anomalías en el mapa de Campo Total. También se muestran las trazas de la falla inferidas (guinda) deducidas de estos datos y las conocidas (rojas) a partir de la topografía y el trabajo de campo.

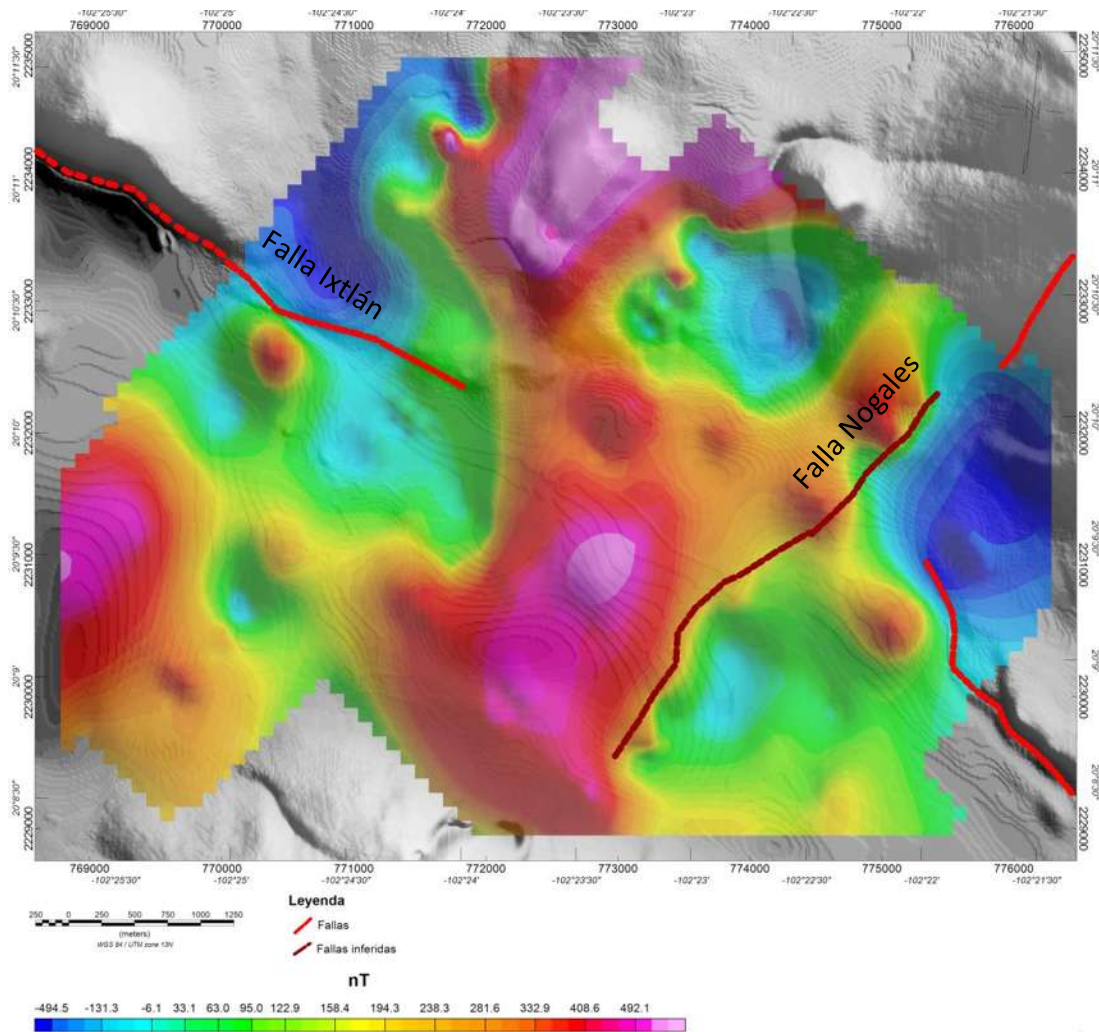


Figura 65. Mapa de modelo digital de elevaciones sobrepuesto con los valores de campo magnético reducidos al polo (CTRP). El mapa también muestra las trazas de las fallas principales.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Los altos magnéticos relativos al norte del mapa son debidos a las estructuras volcánicas allí localizadas, mientras los altos relativos presentes en el centro-sur del mapa (zona lacustre) son más relevantes y se pueden interpretar como un cuerpo ígneo cristalizado o en proceso de cristalización en el valle de Ixtlán, zona de sedimentación de centenas de metros de depósitos lacustres posiblemente intercalados con lavas más antiguas y sobreyacido por los depósitos aluviales recientes del Rio Lerma.

De estos altos magnéticos relativos el más importante es el del centro del mapa y que se extiende hacia el S; sin embargo, este alto parece terminar, pero esto es un efecto propio del *software Oasis-Montaj* y está relacionado con la terminación de los datos medidos. Solo al completar los levantamientos se podrá entender si el alto sigue al SO. La forma de la anomalía presenta un alargamiento en dirección NE-SO, paralela a la falla Nogales.

Al norte de este alto magnético y con dirección NO-SE hay cuatro altos relativos de menor importancia, distanciados de 1 a 3 km del alto principal, y a unas centenas de metros entre ellos, entre la zona de depositación lacustre y alineados según la dirección de la falla Ixtlán (NO-SE). Estas anomalías positivas presentan valores de unos 200 nT y podría tratarse de cuerpos menores que aprovechan la falla Ixtlán como conducto de ascenso.

La Fig. 66 muestra el mapa con los valores magnéticos reducidos al polo y posteriormente con la aplicación del filtro denominado "Primera Derivada vertical" (1aDz). La primera derivada calcula la tasa de cambio del campo magnético sobre un mismo punto y tiene un efecto de nitidez de la anomalía que mejora su ubicación. En otras palabras, este filtro muestra la variación de la fuerza del campo magnético en sentido vertical: donde es mayor hay un potencial contacto entre un cuerpo altamente magnético y uno con muy poco (elevado contraste). El mapa también muestra las trazas de las fallas principales y la aplicación del filtro 1aDz y las manifestaciones termales superficiales.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

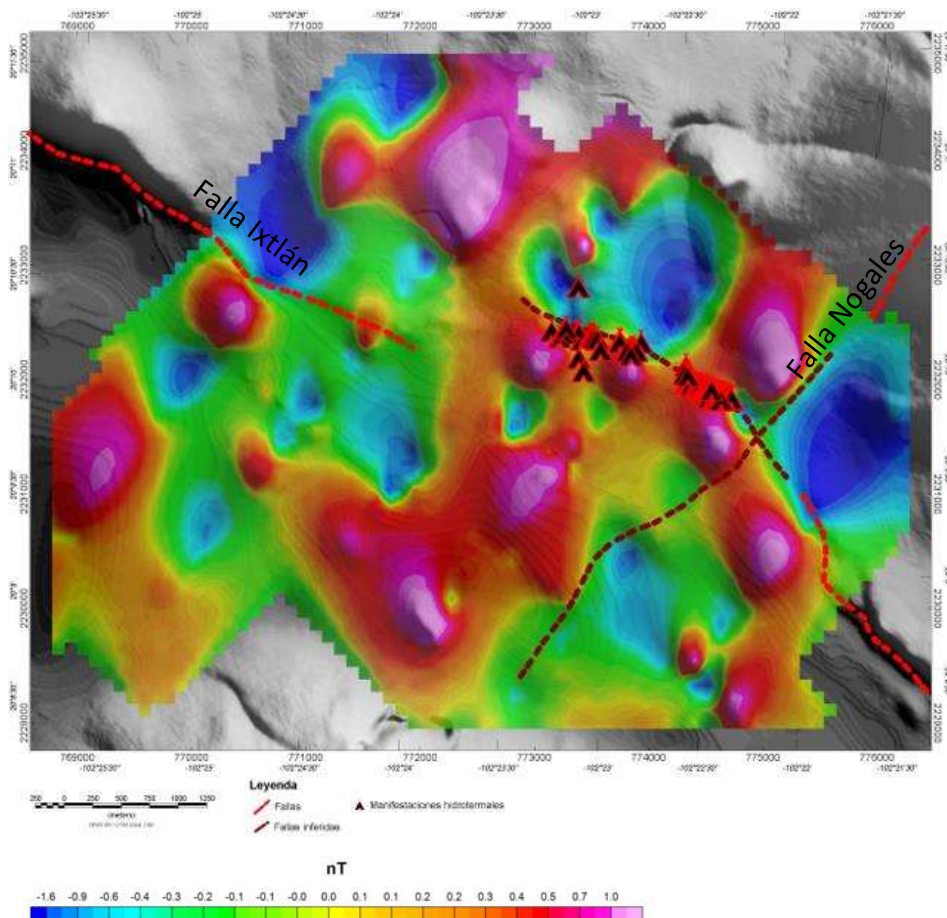


Figura 66. Mapa de valores de Campo Total con filtros de Reducción al Polo y Primera Derivada Vertical (1aDz). El mapa también muestra las trazas de las fallas principales, y su relación con las manifestaciones termales superficiales.

La Fig. 67 presenta los mismos valores de campo total reducidos al polo y después de la aplicación del filtro “Continuación Ascendente” a 300 metros (RP CA 300). Este filtro calcula los valores de campo magnético en un plano situado a diferentes alturas que el plano de observación original (superficie terrestre, en este caso), eliminando las anomalías causadas por las fuentes más superficiales y los ruidos antropogénicos, produciendo una malla con valores más suavizados. Esta transformación facilita la identificación de las anomalías y estructuras regionales (cuerpos magmáticos, fallas, fracturas, diques, etc.).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

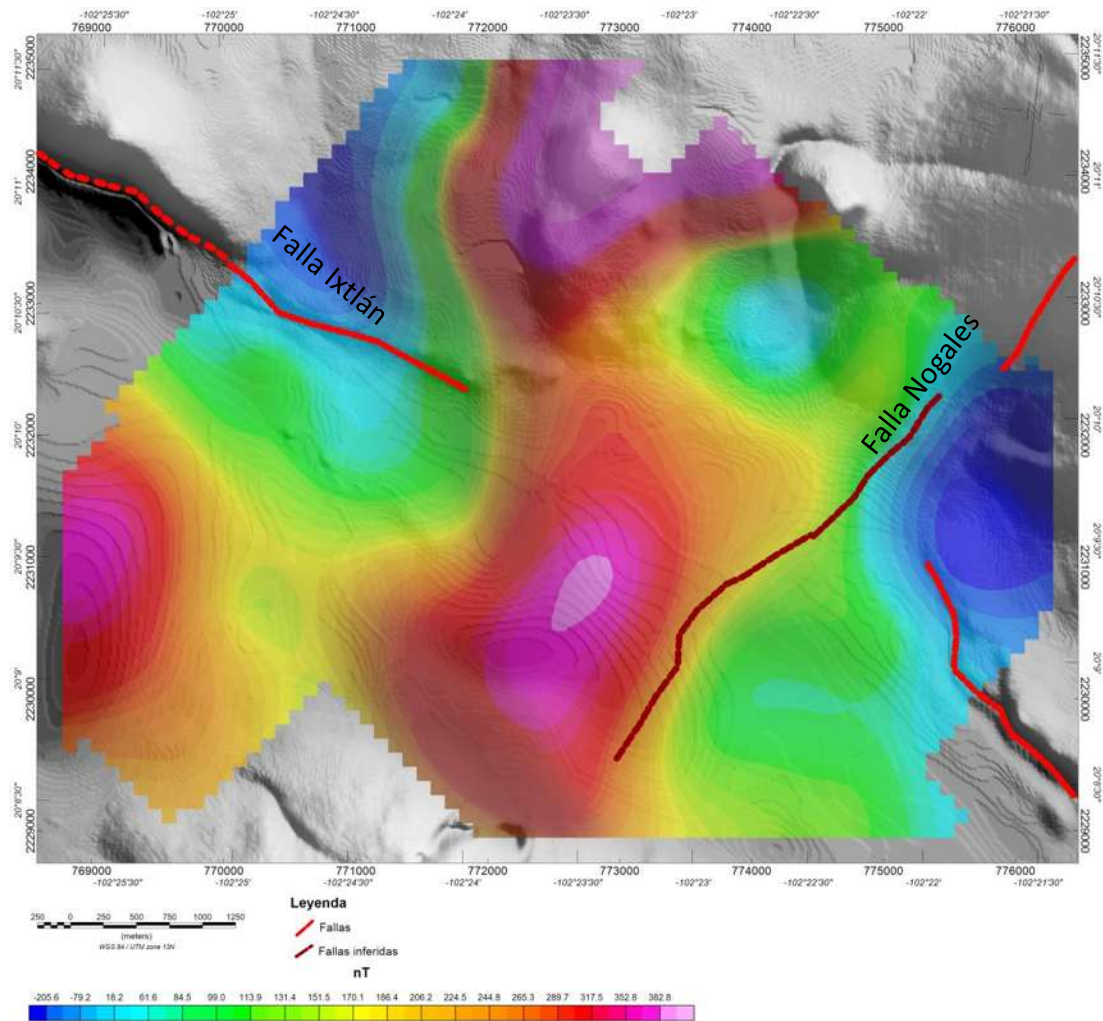


Figura 67. Mapa de Continuidad Ascendente a 300 metros (RP CA 300). El mapa también muestra las trazas de las fallas principales.

El filtro CA aplicado a los datos de Ixtlán muestra a 300 metros la anomalía más importante, comparándola regionalmente, esta se alinea con la traza de la falla Nogales (NE-SO). Como se ha especificado más arriba, esta anomalía positiva podría continuar al SO, aunque la presencia en superficie del Volcán La Mesa ocultaría el efecto del cuerpo sepultado.

También se realizó el modelo 3D del campo magnético reducido al polo residual (CMRP-residual) (Figura 68), el cual es la diferencia entre los datos obtenidos de CTRP y RP CA 300, en otras palabras, este modelo representa la influencia del campo magnético local. El



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

CMRP-residual también muestra las trazas de las dos fallas principales y su relación con la localización de las manifestaciones hidrotermales superficiales. Por lo anterior, los datos magnéticos permiten inferir como un potencial cuerpo ígneo, asociado a una anomalía magnética positiva ha podido ascender a través de la falla Nogales (NE-SO). Esta inferencia permite pensar que este cuerpo dada su tendencia NE-SO alineada con volcanes es un dique.

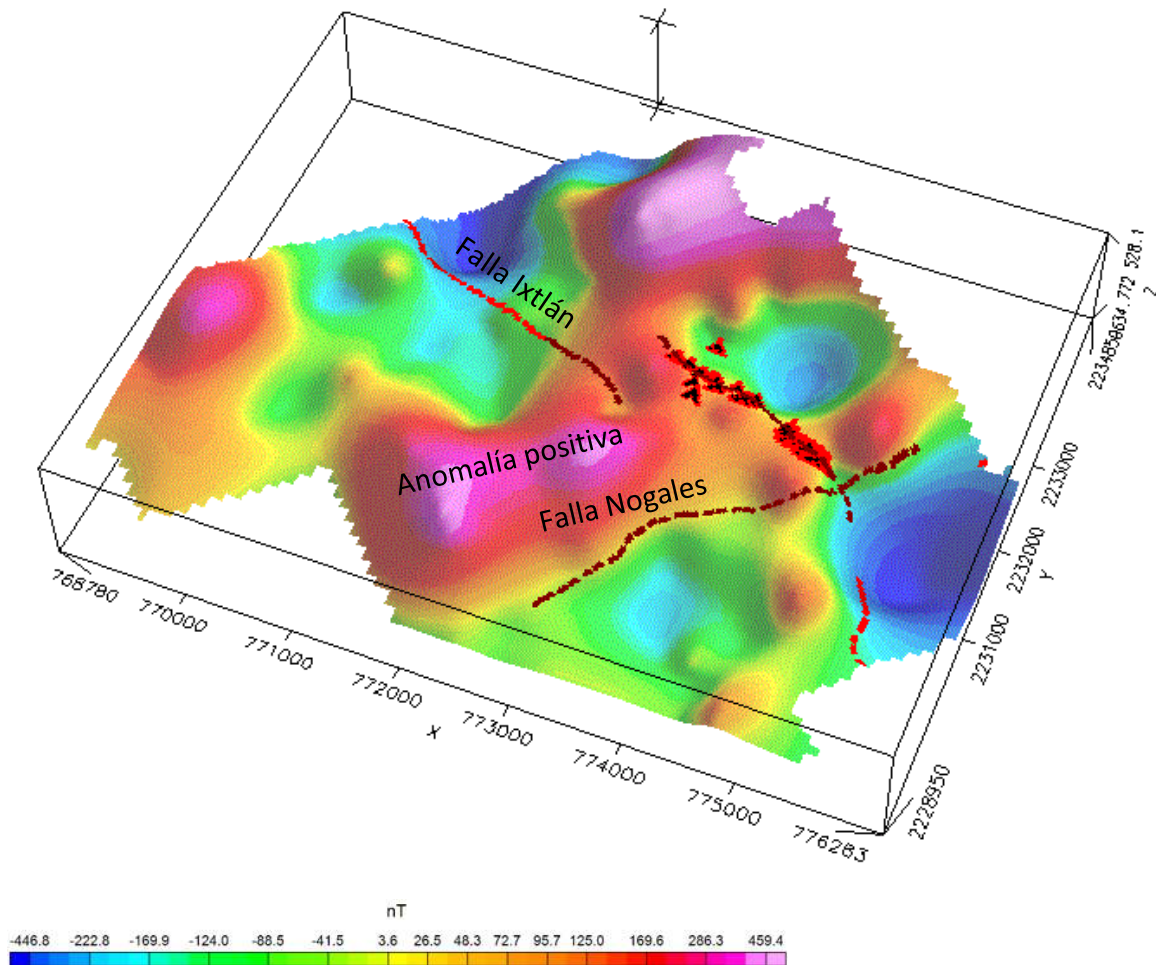


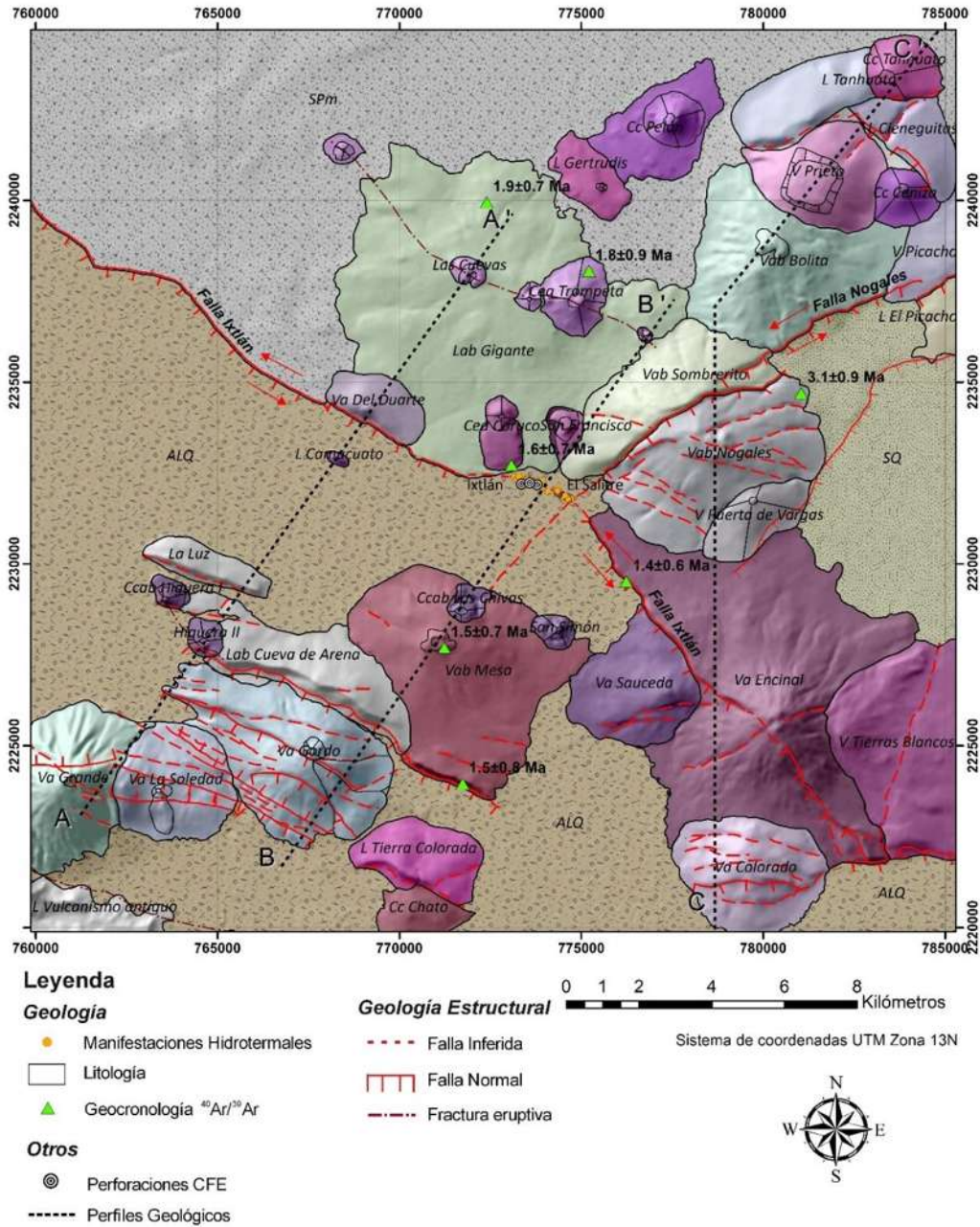
Figura 68. Modelo 3D del campo magnético reducido al polo residual (CMRP-residual) y el trazo de las fallas principales y las manifestaciones hidrotermales (triángulos rojos con negro). La falla Nogales se relaciona con la anomalía positiva en el valle de Ixtlán; y se interpreta como la intrusión de un dique y por tanto puede tratarse de la posible fuente de calor de la ZGIH.

MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO

TANIA GASPAR PATARROYO

V.VI Secciones Geológicas

Se realizaron tres secciones geológicas (Fig. 69) con el objetivo ilustrar parte de la evolución volcanoestratigráfica de la zona de estudio y a su vez reconocer los elementos del sistema geotérmico. Para el establecimiento de los espesores se tuvo en cuenta la información litológica registrada por Viggiano-Guerra y Gutiérrez-Negrín (2006,2007) (Ver Fig. 18) de los primeros 159 metros de profundidad de pozo N°3.



En general, el basamento de la ZGIH podría tratarse de una secuencia de eventos previos al CVTM, como por ejemplo el vulcanismo silíceo (ignimbritas) de la Sierra Madre Occidental (SMO), seguido por una intercalación de eventos de depositación lacustre y vulcanismo entre el Mioceno y Plioceno (andesitas). Como se mencionó, la mayor parte del vulcanismo que aflora en la ZGIH es posterior al Plioceno medio (*Spm*) a excepción de las lavas de Cueva de arena y La Luz (*Lab Cueva de arena* y *La Luz*); este antiguo edificio (posiblemente de final del Mioceno) es exhumado a través del corredor de fallas Mezquite de comportamientos normales y direcciones NO-SE.

El **perfil A-A'** (**Fig. 70**), ilustra parte de la evolución volcánica y estructural del área; inicia con el Volcán Grande (*Va Grande*) siendo afectado por la Falla de Pajacuarán (normal- ENE-OSO); seguido por parte del *Va Gordo*, posteriormente por el edificio exhumado de *Lab Cueva de arena* y *La Luz*. A continuación, se llega al valle de Ixtlán donde se aprecia la intrusión de la isla volcánica Camucuató sobre los sedimentos lacustres y aluviales Cuaternarios (ALQ), posteriormente la falla Ixtlán afecta al *Va Del Duarte* y la *Lab Gigante* de tal forma que gran parte de estos está cubierto por ALQ. El perfil finaliza con el derrame de *Lab Gigante* coronado por un lineamiento de conos de escoria (en el perfil *Ce Las Cuevas*) que definen una fractura eruptiva NO-SE.

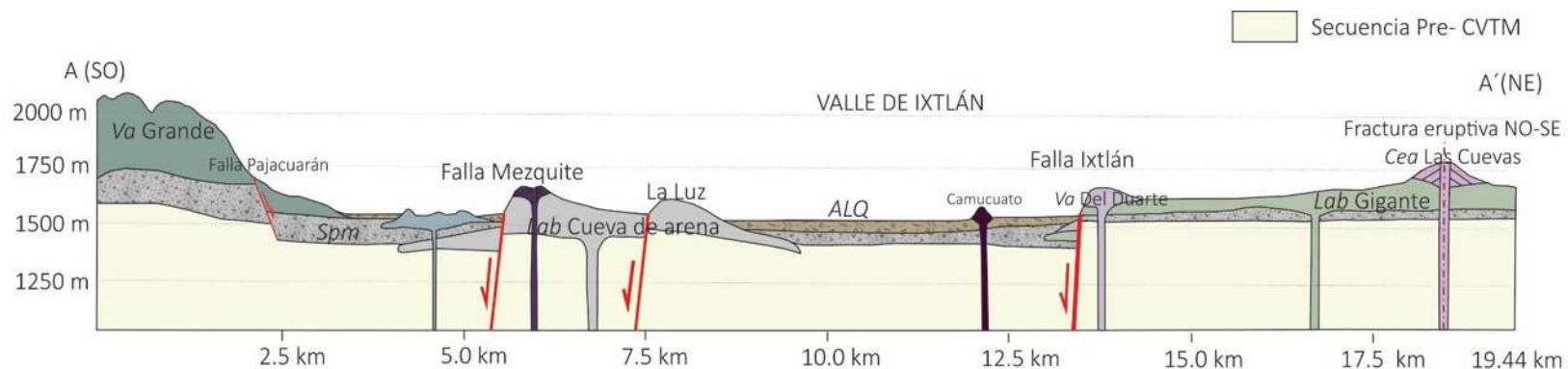


Figura 70. Perfil A-A'

El **perfil B-B'** (Fig. 71), corresponde a un perfil maestro dado que permite el reconocimiento de los elementos del sistema geotérmico y muestra como al SO de la ZGIH aflora parte del vulcanismo del Plioceno superior. En este perfil está representando al *Va Gordo* afectado por el sistema de fallas NO-SE, a continuación, la falla Mezquite parte del sistema de fallas NO-SE exhuma el vulcanismo del Mioceno superior; sobreyaciendo está el Volcán La Mesa y conos cineríticos asociados (en este perfil el *Ccab Las Chivas*) que representan el vulcanismo más joven de la zona de estudio. Posteriormente, se observa el semi-graben definido por la falla Ixtlán. Finalmente se observa parte del volcán Sombrerito y en este punto sobreyacido por el *Ce San Francisco* y finalmente la *Lab Gigante* coronada por conos de escoria del lineamiento NO-SE.

En cuanto al reconocimiento de los elementos del sistema geotérmico, dado que la anomalía magnética positiva se localiza en cercanías a este vulcanismo joven se plantea la hipótesis que ésta representa un conducto que alimentó el vulcanismo y por tanto es la fuente de calor del sistema geotérmico. La secuencia previa al CVTM es la unidad reservorio y los fluidos albergados en éste ascienden a través de la falla Ixtlán (NO-SE) y se expresan superficialmente por medio manifestaciones hidrotermales. La recarga del sistema con certeza es favorecida por el fallamiento que caracteriza a la zona regionalmente.



Figura 71. Perfil B-B', con el reconocimiento de los elementos del sistema geotérmico.

El **perfil C-C'** (Fig. 72), muestra la evolución vulcanológica con tendencia NS y NEN-SOS en la zona de estudio. También se observan las fallas principales Ixtlán y Nogales, la primera afectando al Volcán Encinal ( $1.4 \pm 0.6$  Ma) y la segunda afectando al volcán Sombrerito y a su vez permitiendo el ascenso del Volcán Nogales ( $3.1 \pm 0.9$  Ma), también se observa una posible fractura eruptiva que permitió el emplazamiento del Volcán Puerta de Vargas. En el sector sur del corte se observa el volcán Colorado afectado por una serie de lineamientos con la tendencia E-O.



Figura 72. Perfil C-C'.

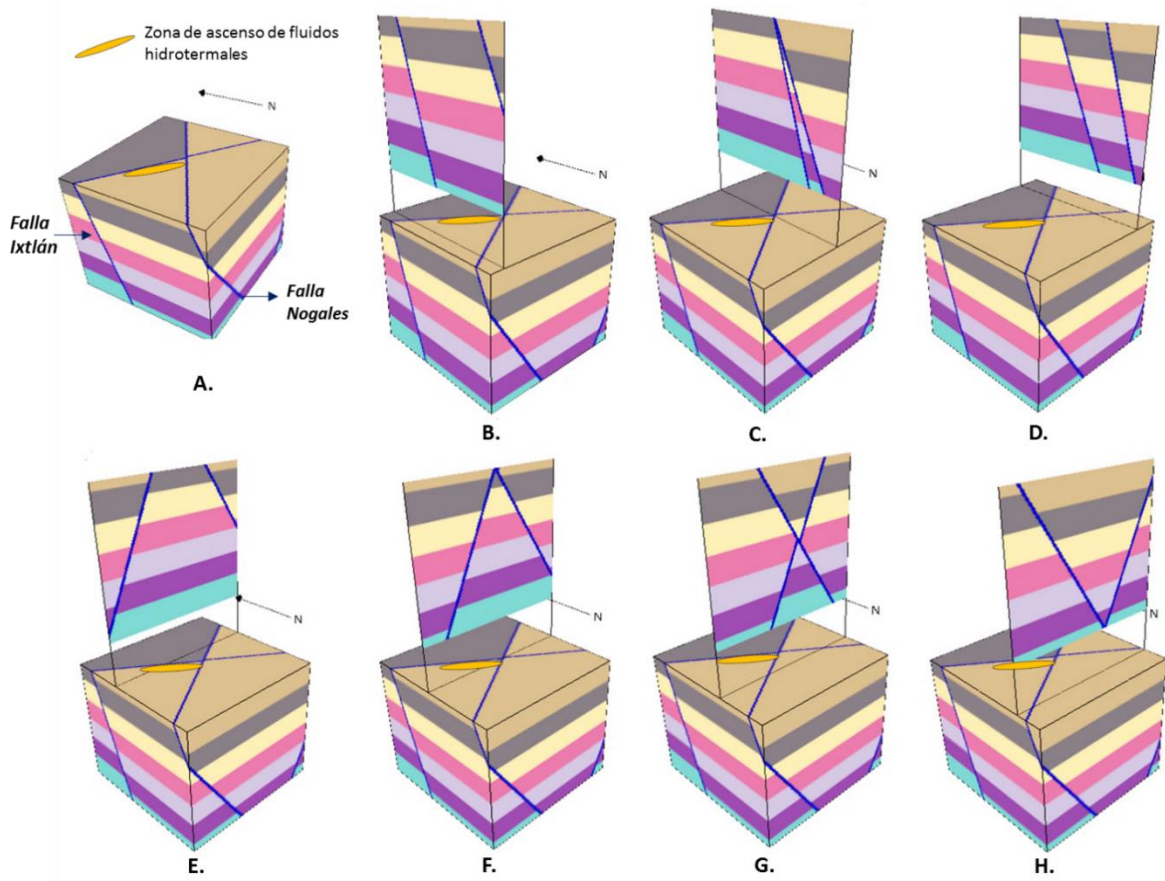
### V.VI.I Geometría del Yacimiento

Haciendo una analogía con los yacimientos de hidrocarburos, el petróleo es atrapado en una unidad porosa ya sea por una configuración estructural y/o litológica especial (ej. Facies y discontinuidades) que le pone en contacto con unidades impermeables; extrapolando este concepto a los yacimientos geotérmicos, la geometría corresponde a la trampa estructural que permitió tanto el desarrollo del sistema geotérmico como su entrapamiento y por lo tanto le confiere mayor potencial económico. Según sea la geometría de un yacimiento, ésta puede exhumar virtualmente la unidad reservorio o almacén, entrapar el recurso en una unidad permeable y/o configurar un escenario estructural favorable para el ascenso de fluidos geotérmicos. En el caso de Ixtlán, el establecimiento de la geometría es crucial dado que es una herramienta para la interpretación geológica de estructuras a profundidad que pueden ser inferidas por ejemplo por sísmica de refracción o magnetometría e incluso por si misma aporta ideas sobre la mejor zona para perforar.

El escenario estructural de la ZGIH, corresponde a una intersección de fallas que formó respecto al cruce de fallas (Fig. 73), semi-grabenés al occidente (Perfil A.) y oriente (Perfil B.), un horst al norte (Perfil E.) y un graben sobre un horst al sur (Perfil G). Así, esta geometría configura una trampa estructural que sella el yacimiento de Ixtlán al norte con un horst (Perfil E.) y al sur con un graben (Perfil H) que permitió mayor acomodación de sedimentos impermeables en contraste con el graben occidental, y que explica porque la falla Nogales actúa como una frontera geológica (limitando las manifestaciones hidrotermales). También esta geometría acerca virtualmente el reservorio, es decir, la intercalación de eventos pre-CVTM está a menor profundidad en del lado occidental que en el sur (Fig. 73).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO



**Leyenda**

- Sedimentos aluviales y lacustres (Plioceno Superior-Cuaternario)
- Sedimentos Lacustres (Plioceno Inferior-Medio)
- Intercalación de eventos lacustres y volcánicos (Mioceno Superior)
- Vulcanismo pre-CVTM (Oligoceno Superior -Mioceno Medio)

Figura 73. Geometría y perfiles. **A.** Geometría de cruce de fallas de la ZGIH.

Perfiles NS, **B.** Semi-graben occidental, **C.** Perfil sobre el cruce de fallas, **D.** Semi-graben oriental.  
Perfiles EO, **E.** Horst norte, **F.** Perfil sobre cruce de fallas, **G.** Graben superior y horst inferior al sur, **H.**  
Graben sur.

### V.VII Modelo Conceptual

Se ha mencionado que típicamente un sistema geotérmico consta de una fuente de calor, un reservorio, una capa sello y un sistema de fracturas y fallas encargadas del ascenso de fluidos y recarga del acuífero geotérmico. En este trabajo a partir de lo reconocido a nivel geológico, vulcanológico y estructural, así como un estudio magnético local de la ZGIH se realizó un reconocimiento de los elementos del sistema geotérmico, deduciéndose que la fuente de calor podría tratarse de un dique en enfriamiento, con tendencia NO-SE favorecida por la falla Nogales y dado el contexto tectónico extensivo de los alrededores de Ixtlán el calor también es aportado por el gradiente geotérmico anómalamente alto. Por su parte, el reservorio se atribuye a la secuencia previa al CVTM que localmente podrían ser andesitas e ignimbritas que no afloran en el área de estudio pero que han sido reconocidas en la zona del Graben del Cotija (al occidente de la ZGIH). Mientras la capa sello se asocia a la silicificación de los sedimentos lacustres dada la cantidad de solutos que acarrear los fluidos geotérmicos de Ixtlán.

Asimismo, es evidente que la zona está caracterizada por un sistema de fracturas complejo desarrollado por la interacción entre las fallas Ixtlán y Nogales, particularmente por su orientación optima a los campos de esfuerzo actuales (extensivo y transtensivo) que les confiere componentes laterales izquierdas que favorecen una zona de deformación frágil. Por tanto, la intersección de estas fallas es un escenario estructural idóneo para el ascenso de fluidos, además el yacimiento posee una geometría de intersección que configura una trampa estructural para el yacimiento. Finalmente, la recarga del acuífero es regional y favorecida por las múltiples fallas y facturas en el área.

Teniendo en cuenta lo anterior el modelo conceptual de la ZGIH (Fig. 74) es presentado:



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

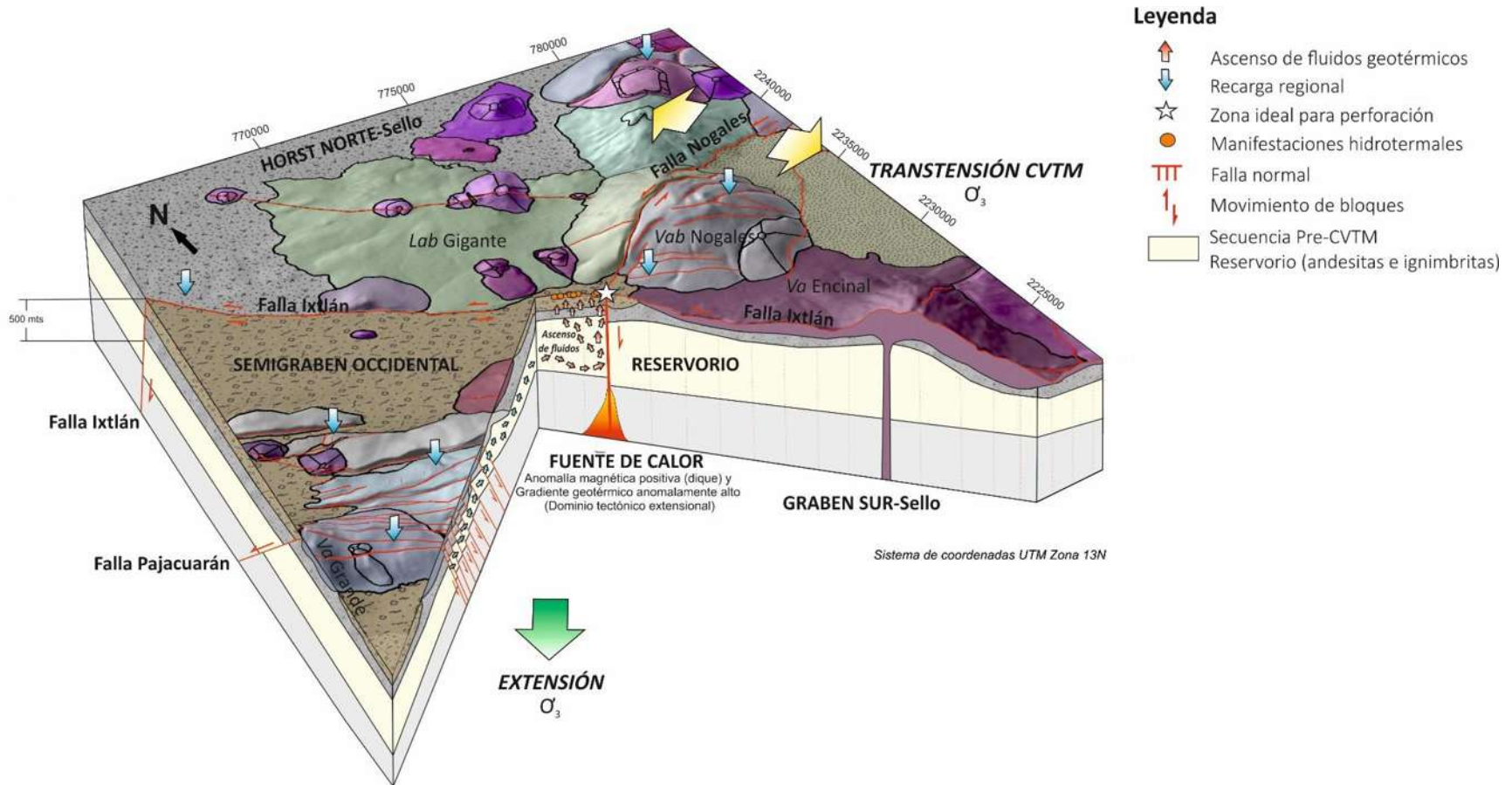


Figura 74. Modelo Conceptual de la ZGIH.

El modelo posee una leyenda completa en donde se identifican los elementos importantes para su comprensión. Obsérvese que el modelo tiene el mapa geológico de la ZGIH para mejor comprensión de los componentes del sistema geotérmico (fuente de calor, reservorio, capa sello, fracturamiento y fallamiento y recarga). Es claro que los eventos geológicos que afloran en el área son posteriores a la formación del compendio de rocas que forman el reservorio, pero como se mencionó al oeste de la zona de estudio en el Graben de Cotija se identificaron ignimbritas asociadas a las etapas finales del SMO sobreyacidas por los eventos previos al CVTM (andesitas). En cuanto al régimen tectónico que actúa en el área, se muestra que corresponde a la conjunción de dos, uno extensivo (flecha verde) y otro transtensivo (flechas amarillas), en el modelo se muestra el  $\sigma_3$  o la componente mínimo esfuerzo.



## Capítulo VI. Discusión

### *Geología*

A partir de los hallazgos sobre la geología de la ZGIH, se evidenció que en el área priman unidades volcánicas y sedimentarias, las dos guardan relación con el intenso fallamiento que caracteriza la zona producto de su contexto transtensivo y extensivo asociado a la tectónica del sector central y el sector occidental del CVTM respectivamente; permitiendo el desarrollo de escenarios estructurales potenciales para el ascenso de fluidos geotérmicos. Concordando con lo observado por Del Castillo, Martínez y Márquez (1970) quienes mencionan que la actividad geotérmica de la ZGIH está directamente relacionada a los fenómenos tectónicos como volcánicos acontecidos. Estos resultados guardan relación con lo descrito también por Banwell y Gómez (1970) y Rosas-Elguera (1989).

### *Estratigrafía*

La evolución geológica de la ZGIH inicia con el vulcanismo del Plioceno inferior, seguido por sedimentación lacustre durante el Plioceno medio, y a continuación una reactivación del vulcanismo durante el Plioceno superior y una concentración de la actividad durante el Pleistoceno inferior-medio, lo anterior es deducido a partir del establecimiento de relaciones de superposición entre eventos, fechamientos  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y observaciones geomorfológicas, estableciéndose un mapa geológico completo donde el polígono litológico de cada edificio volcánico o unidad sedimentaria fue definido, estos resultados contrastan con el mapa geológico de Viggiano-Guerra y Gutiérrez -Negrín, (2006) el cual es profundamente diferente al establecido en este trabajo, dado que estos autores realizaron una definición no detallada de los polígonos de cada edificio volcánico, ni de las unidades sedimentarias aflorantes.

### *Vulcanismo ZGIH y su relación con el CVMG*

En la cartografía geológica realizada se ha podido observar que el área circundante a la ZGIH presenta múltiples episodios volcánicos acompañados de escasa actividad piroclástica. En



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

general el vulcanismo de área presentó un comportamiento poco explosivo que se puede explicar dada la composición andesítico-basáltica y andesítica de las rocas aflorantes; por lo anterior la actividad ha sido principalmente efusiva posiblemente ligada al contexto transtensivo y extensivo que ha favorecido el ascenso de mayores volúmenes de magma en correlación a otros sectores del CVMG. En cuanto al estilo eruptivo, los volcanes semi-escudo y derrames de lava identificados demarcan actividad efusiva y de tipo hawaiano; y tipo estromboliano para los conos cineríticos y de escoria. La morfología suave de los derrames de lava permite inferir que las erupciones asociadas fueron en cortos periodos de tiempo, lo que implica, que el vulcanismo alrededor de la ZGIH es monogenético y ligado a la evolución del CVMG (< 3.5 Ma). Esta observación ya había sido establecida también por Hasenaka y Granados (1994), pero no presentaba un sustento estructural para el vulcanismo contrastante.

En cuanto a la afinidad geoquímica general de CVMG esta es calco-alkalina mayormente andesitas basálticas y andesitas (Luhr *et al.*, 2006) lo que coincide con los hallazgos de Ixtlán, no obstante el vulcanismo de esta zona tiene un ligero enriquecimiento en potasio como el observado por ejemplo en la zona de Cuitzeo (Trujillo-Hernández, 2017) no obstante este último no presenta un enriquecimiento tan visible como el de Ixtlán.

*Volcanoestratigrafía*

Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi (1992), realizaron un estudio de magnetoestratigrafía volcánica y dataciones K-Ar indicando que la actividad volcánica al oriente del Lago de Chapala se desarrolló desde el Cron 8 (Mioceno tardío, fechamiento K-Ar de  $8,8 \pm 0,8$  Ma) hasta el Cron Brunches (0-0.73 Ma) o reciente. Esto guarda relación con lo observado en el área, pero con diferencias en cuanto a la precisión de la cronología. Teniendo en cuenta las edades calculadas con el método  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  en este trabajo, se ha hallado que en el vulcanismo de los alrededores de la ZGIH abarca desde 4 a 1.2 Ma con un pico o concentración de actividad entre los 2.2 Ma y los 1.2 Ma.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

*Manifestaciones Hidrotermales*

La primera cartografía de las manifestaciones hidrotermales de la ZGIH realizada por Waitz (1906), arrojó resultados idénticos a la establecida por este trabajo, en cuanto a la distribución y tendencia estructural NO-SE de las manifestaciones, no obstante, en cuanto a la abundancia difiere; dicho autor cartografió 600 manifestaciones, mientras en este trabajo solo 160; lo anterior implica un posible descenso en el nivel freático del área o bien un abatimiento del acuífero superficial en los últimos 110 años; esto puede estar relacionado a la capa impermeable que representan las poblaciones urbanas y que han restringido la recarga del acuífero superficial a nivel local y/o por la sobreexplotación del agua para cultivos.

En cuanto al comportamiento tipo géiser de las manifestaciones hidrotermales, se infiere que este es controlado por la interacción entre el agua de menor temperatura del acuífero superficial y la de mayor temperatura del acuífero termal más profundo, lo que genera un choque térmico que explica dicho comportamiento tanto para las manifestaciones termales naturales como para la actividad de los pozos perforados por CFE en la década de los cincuenta. La variabilidad de estos fenómenos tiene relación con las estaciones del año, lo que concuerda con el planteamiento de Banwell y Gómez-Valle (1970), sobre la diferencia de niveles hidrostáticos y su relación con la actividad tipo géiser. Asimismo, las observaciones de Tello-Hinojosa (1986) rectifican esta inferencia al mencionar que las aguas de los manantiales de la ZGIH son una mezcla de aguas meteóricas y geotérmicas.

Por otra parte, el trazo de las manifestaciones hidrotermales es evidencia del vínculo entre los dos tramos de la falla Ixtlán, permitiendo interpretar que el ascenso de fluidos hidrotermales es controlado por esta falla, no obstante, la limitación de la distribución de las manifestaciones es definida por la falla Nogales, por tanto, esta última debe ser considerada como un límite geológico, lo que concuerda con lo observado también por Rosas-Elguera (1989). La distribución de temperaturas arrojó que las aguas de las manifestaciones más calientes (hasta 92°C) se concentran en el área de El salitre, precisamente cerca de la intersección entre las fallas Ixtlán y Nogales.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

En cuanto a la composición química del agua de los manantiales de Ixtlán gracias a los trabajos de Banwell y Gómez-Valle, (1970) y Tello-Hinojosa (1986), se conoce que esta es Clorurado-Sódica con ligera tendencia hacia los sulfatos, lo que hace inferir que el reservorio esta albergado en rocas volcánicas. Adicionalmente interpretamos que esta zona de ascenso hidrotermal corresponde al *upflow* o zona de ascenso directo, lo que tiene implicaciones económicas positivas, por su cercanía a la fuente de calor.

Los depósitos de sinter del área de Ixtlán son indicativos de la carga de sílice disuelta en el agua que a su vez permite el desarrollo de un proceso de silicificación de los sedimentos lacustres superiores que favorece el desarrollo de un sello hidrogeológico. Cuando este sello es roto, dada la acumulación de gases, deformación del terreno o bien por actividad sísmica se generan explosiones hidrotermales puesto que la presión del fluido supera a la presión litoestática. Las explosiones freáticas reportadas por Casarrubias (2000), la del presente trabajo ocurrida en 2016 y la ocurrida en 2017 en una casa habitación de la localidad de El Salitre (Protección Civil, en comunicación personal) implican que estos eventos han estado y estarán presentes en la ZGIH y deben ser tenidos en cuenta dentro de la planificación territorial, la gestión del riesgo y el eventual establecimiento de un campo geotérmico.

*Relación estructural*

En el contexto estructural se observó que en general las manifestaciones hidrotermales tienen un patrón NO-SE paralelo al trazo de la Falla Ixtlán, sin embargo, el desplazamiento con respecto al trazo conocido de esta falla es de 1 kilómetro hacia el norte, lo que permite inferir que esta distancia corresponde a una zona de relevo local entre los tramos de la falla Ixtlán. Mientras, los depósitos de sinter pueden guardar una relación con el sistema de fracturas producto de la deformación frágil consecuencia del movimiento lateral izquierdo de la falla Ixtlán; esto concuerda con el análisis de Olvera-García (2017) que relaciona la presencia de depósitos de sinter en la ZGIH con fracturamiento y por ende actividad neotectónica de la falla Ixtlán dado que la edad de estos depósitos (inferida por este autor a partir de la mineralogía) no supera los 10.000 años.



### *Geología estructural*

Rosas-Elguera *et al.*, (1989) señalan la relación de las ZGIH con la evolución tectónica del occidente mexicano; especialmente con el punto triple y su brazo E-O, es decir, el graben de Chapala. Para estos autores las fallas Ixtlán (NO-SE) y Pajacuarán (E-O) corresponden a los límites norte y sur del graben respectivamente, no obstante, este planteamiento es incorrecto dado que la ZGIH no solo está inmersa en la tectónica extensiva occidental o bien la fragmentación del sur de México, sino con la tectónica transtensiva que caracteriza el sector central de CVTM.

Además, las fallas Ixtlán y Pajacuarán no son límites del graben de Chapala, teniendo en cuenta que la falla Ixtlán virtualmente exhuma sedimentos lacustres del Plioceno medio (*SPm*), los cuales no hubiesen podido ser depositados sin la apertura del Graben de Chapala y el sistema de fallas E-O inherente a ésta, demostrando que la falla Ixtlán es posterior al fallamiento Chapala tanto por su orientación (NO-SE) como por el hecho que afecta la unidad *SPm*. Por su parte la falla Pajacuarán es una falla activa que no pertenece al sistema inactivo del graben (aulacógeno) de Chapala (Garduño-Monroy y Tibaldi, 1993).

Asimismo, para estos autores la falla Ixtlán sufre una flexión de 22° y ha sido trazada como curva en la altura de Ixtlán y El Salitre, sin embargo, teniendo en cuenta el trazado de las manifestaciones esta interpretación es incorrecta y proponemos que lo que realmente ocurre allí es una transferencia de la deformación, es decir una zona de relevo entre trazos de la falla Ixtlán, producto de su componente lateral izquierda. Esta configuración es fundamental para el ascenso de fluidos geotérmicos dado que entre los trazos de la falla Ixtlán se estableció una zona de extensión local como una pequeña cuenca *pull-apart*.

### *Geometría del Yacimiento*

El levantamiento por sismología de refracción realizado por Del Castillo y Díaz-Pérez (1970) les permitió plantear la existencia de un graben de 4 km de ancho con orientación NS en el entre los poblados de Ixtlán y San Simón-La Estanzuela y un horst en la parte norte de la zona geotérmica definidos por el cruce de las fallas Ixtlán y Nogales. Estos resultados



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

concuerdan con las inferencias hechas solo a partir de la geología estructural en este trabajo. Estableciéndose que la intersección de fallas configura una geometría de cuadrantes que actúa como trampa estructural del yacimiento de Ixtlán.

Con respecto al cruce de fallas el yacimiento es sellado al norte por un horst y al sur por un graben y adicionalmente, éste graben es más profundo y permite una mayor acumulación de sedimentos impermeables que explica porque después de la falla Nogales no continúan las manifestaciones termales. Asimismo, mencionamos que del lado este y oeste del cruce se definen dos semi-graben y que el semi-graben occidental tiene importancia geotérmica dado que acerca virtualmente al reservorio que sumado a la zona local de extensión de la falla Ixtlán permitieron el establecimiento del sistema geotérmico. La compresión de la geometría que implica cada escenario estructural favorable es un proxi para definir zonas de interés geotérmico sin manifestaciones hidrotermales superficiales que puede ser aplicado en la exploración geotérmica del occidente mexicano.

*Modelo Conceptual*

En general, dado el contexto transtensivo y extensivo, la hipótesis más fuerte apuntaría que el calor del sistema geotérmico de Ixtlán está asociado al gradiente geotérmico, sin embargo, el estudio magnetométrico del área muestra una anomalía positiva al suroeste de las manifestaciones hidrotermales en el valle de Ixtlán. Teniendo en cuenta que típicamente las anomalías magnéticas positivas dentro de un contexto sedimentario reflejan la presencia de intrusivos magmáticos, se infiere que ésta tiene una relación con un cuerpo ígneo. Una anomalía similar se puede observar en el mapa de anomalía de Bouguer de Ortiz-Prieto, (2007) (Fig. 16), que a pesar de ser un mapa muy regional, presenta una anomalía gravimétrica positiva con geometría similar a la vista en el valle de Ixtlán a través del estudio magnético; este contraste precisamente por los sedimentos lacustres, es evidencia de un cuerpo denso y magnético que en este trabajo se asocia a un cuerpo ígneo en enfriamiento pero con suficiente calor remante para funcionar como una fuente de calor para el sistema geotérmico de Ixtlán.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Por ello se hizo necesaria la propuesta de un modelo conceptual (Fig. 74) que se ajustará al hecho que la falla Ixtlán (Normal izquierda NO-SE) favorece la circulación y ascenso de fluidos geotérmicos profundos cuya temperatura se asocia no solo al gradiente geotérmico a profundidad, sino a un posible dique. Dicha hipótesis encuentra sustento tanto por el contexto tectónico que favorece vulcanismo monogenético y emplazamiento de bolsas de magma y los análisis químicos de gases emitidos por los manantiales termales de la ZGIH realizados por Polak *et al.*, (1982, 1985) que muestran una composición isotópica y concentración de gases que sugieren una componente manto/magmática en el sistema geotérmico de Ixtlán especialmente marcado por la relación  $^3\text{He}/^4\text{He}$ . Llegándose a la conclusión que la fuente de calor de este sistema geotérmico es un conjugado entre el calor aportado por un anómalo gradiente geotérmico y posibles cuerpos andesítico basálticos.

Para el caso de la ZGIH dado su contexto tectónico-volcánico y los hallazgos antes mencionados los tipos de *plays* geotérmicos posibles en los que se pudiera enmarcar la zona, definidos por Moeck, (2014) corresponden a los de convección dominante, siendo el de dominio extensional y el magmático los más factibles dado su contexto transtensivo-extensivo y de vulcanismo reciente. Por lo anterior se propone que el *play* del sistema geotérmico de Ixtlán de los Hervores es híbrido, es decir, la Falla Ixtlán favorece la circulación y ascenso de fluidos geotérmicos profundos cuya temperatura se asocia no solo al gradiente geotérmico a profundidad, sino que nuevas evidencias muestran la existencia de una posible fuente de calor relacionada con la existencia de una anomalía magnética positiva.

Aunque los datos que alimentan el modelo conceptual planteado sean solo geológicos, vulcanológicos y estructurales, son la base para las interpretaciones de datos cuantitativos como los que deben ser aportados por métodos geofísicos. Claramente, este modelo es una idea sujeta a modificaciones donde más información por ejemplo geofísica y de pozos exploratorios ha de afinar el modelo conceptual de la ZGIH, asimismo se sugiere que para la próxima etapa exploratoria de la ZGIH se cuente con sondeos magnetoteléuticos. No



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

obstante, como se mostró en el apartado de antecedentes la información que se tenía de la ZGIH era pobre e insuficiente para lo que ahora se interpreta con este trabajo.

*Perspectiva*

Durante los años cincuenta en la ZGIH se realizaron como mínimo tres perforaciones con objetivo de generar energía eléctrica sin éxito, no obstante, el Pozo 2 conocido como el “Géiser de Ixtlán” ha sido el único aprovechado a través de la balneología; con certeza dicha situación desmotivó la continuación de la exploración en la zona por el gasto económico que implicó. Es importante comprender que la ubicación de los pozos siguió el trazo de la Falla Ixtlán, pero como es evidente, interceptar una falla que controle el ascenso de fluidos hidrotermales no es garantía de éxito. Adicionalmente, para reanudar la explotación de la ZGIH es necesario tener en cuenta que es posible tener pozos productores y no productores sobre el trazo de una misma falla, pero que los productores usualmente están más relacionados a la permeabilidad producto del cizallamiento activo que a la falla en si misma (Faulds y Hinz, 2015). Gracias al modelo conceptual planteado en el presente trabajo se sugiere que la mejor zona para perforar corresponde a la intersección de fallas donde el fracturamiento es mayor y por ende las probabilidades de éxito superiores.



## Conclusiones

### *Geología y vulcanología*

- La Zona Geotérmica de Ixtlán (ZGIH) es resultado de la conjunción de dos regímenes tectónicos, uno relacionado a la tectónica transtensiva que caracteriza la región central del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y otro, propuesto primera vez en este trabajo, asociado a la extensión del sector occidental del CVTM, pero más relacionada con la fragmentación del suroccidente de México.
- Dado este contexto, en la zona predominan unidades volcánicas y depósitos sedimentarios asociados al paleolago de Chapala.
- El vulcanismo del área es de composición andesítico basáltica a dacítica, de afinidad calco-alcalina; dicha actividad se extiende desde el Plioceno inferior, seguida por la depositación lacustre del Plioceno medio y reactivada a partir de entonces con mayor actividad entre los 2.2 y 1.2 Ma.
- La extensión característica del área permitió el ascenso de grandes volúmenes de magma dando lugar a volcanes con morfología en semi-escudo principalmente; lo que contrasta con lo mayormente observado en otros sectores del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG).
- Es importante resaltar que en esta zona existió una tasa de vulcanismo particularmente mayor que la promedio del CVMG, lo que se asocia por primera vez en este trabajo a la intersección de tres grandes sistemas de fallamiento (fallamiento del CVTM, del graben de Penjamillo y del semi-graben de Cotija).
- Los estilos eruptivos dominantes del área de estudio son hawaiano y en menor medida estromboliano. No obstante, eventos como corrientes de densidad piroclástica diluida fueron identificados en las secuencias eruptivas de conos cineríticos, asociados a eventos hidromagmáticos y evidencia la interacción magma-acuífero superficial.



*Geología estructural*

- Las estructuras principales de la ZGIH son la falla Ixtlán (NO-SE) y la falla Nogales (NE-SO). La primera responde a la tectónica extensiva y la segunda a un régimen trasntensivo.

*Manifestaciones hidrotermales*

- El sistema geotérmico de Ixtlán se expresa superficialmente a través de manifestaciones hidrotermales con aguas de composición clorurado-sódica, con hasta 92°C de temperatura y depósitos hidrotermales de tipo Sinter, controlados por la falla Ixtlán.
- La falla Nogales (NE-SO) limita al oriente los rasgos antes descritos actuando como una frontera geológica.
- La falla Ixtlán (NO-SE) se presenta como una sola estructura con un ligero arreglo *en echelon* izquierdo, divide en dos tramos conectados por las manifestaciones hidrotermales.
- Las manifestaciones hidrotermales y los depósitos de sinter son evidencias del carácter activo de la Falla Ixtlán. Que debe ser evaluado con mayor detalle tanto para el desarrollo y explotación del yacimiento geotérmico como para el riesgo que representa para las poblaciones circundantes.
- La falla Ixtlán y Nogales configuran un escenario estructural de intersección de fallas ideal para el ascenso de fluidos geotérmicos.
- El potencial de la ZGIH se eleva dado que sus estructuras principales (Falla Ixtlán y Nogales) son favorables a los campos de esfuerzo actuales, por lo tanto, ambas se comportan como fallas normales con componente lateral izquierda.
- La componente lateral en la falla Ixtlán aumenta el esfuerzo de cizalla por consiguiente el fracturamiento y la permeabilidad, asimismo configura una zona de extensión local posiblemente asociada a una zona de relevo de la falla principal.
- Las fallas de sistema Chapala-Tula (E-O y NE-SO u OSO-ENE) conservan evidencias de dos grandes movimientos, uno normal y otro lateral izquierdo. Muchos de los



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

edificios volcánicos tienen las tendencias NE-SO, por lo que consideramos que el magmatismo se está emplazando en un corredor de estructuras de la misma dirección donde grandes diques dan lugar al vulcanismo monogenético.

*Elementos del Sistema Geotérmico*

- La falla Ixtlán da lugar a el ascenso de fluidos hidrotermales desde un acuífero hidrotermal almacenado en rocas volcánicas permeables, correspondientes a las unidades Oligoceno-Mioceno previas al CVTM y que no afloran en el área.
- La falla Ixtlán contribuye al desarrollo de un proceso de silicificación en los sedimentos Cuaternarios suprayacentes que actúan como sello del reservorio geotérmico.
- La geometría de intersección de fallas define al norte un horst y al sur un graben que sellan el yacimiento de Ixtlán; mientras al oeste, configura un semi-graben que acerca virtualmente a la unidad reservorio. Esta geometría fue fundamental para la génesis del sistema geotérmico, puesto que configura una trampa estructural.
- La interacción entre fallas genera el desarrollo de una zona de intensa deformación frágil que permite una alta permeabilidad en el yacimiento. Por tanto, el cruce de fallas es el punto ideal para una perforación.
- La fuente de calor es probablemente un dique (NE-SO) o cuerpo intrusivo en enfriamiento emplazado a través de la falla Nogales, inferido a partir de una anomalía magnética positiva en el Valle de Ixtlán.

*Modelo Conceptual*

- El modelo conceptual que se plantea para esta zona es híbrido, es decir magmático, dado que el vulcanismo reciente de la zona aporta calor al reservorio por medio del dique o cuerpo ígneo de dirección NE-SO en el valle de Ixtlán y de Dominio Extensional con circulación profunda de fluidos dado su contexto tectónico.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

*Perspectiva*

- Se sugiere perforar en la zona de El Salitre cerca al área de intersección de fallas, es decir la de mayor permeabilidad y probabilidad de éxito.
- Es necesario delimitar la zona de interés económico, es decir, el reservorio geotérmico y comprender el comportamiento de los fluidos a profundidad; para ello los sondeos magnetoteléuticos son una herramienta trascendental en el afinamiento del modelo conceptual presentado y debe ser la siguiente etapa en la exploración de este sistema geotérmico.
- El yacimiento geotérmico de la ZGIH es de mediana a baja entalpía y tiene potencial tanto para la generación de energía eléctrica como para usos directos; que podría ser aprovechado para impulsar el desarrollo económico de esta región michoacana.
- Esta zona también debe ser explorada desde el punto de vista arqueológico dado el contenido de cerámica hallado en la zona puede estar asociado a la concepción de los habitantes pre-hispánicos respecto a la geotermia. No obstante, el hecho de que se encontró fragmentado dicho material y en una capa rica en escoria volcánica sugiere que en el área de Ixtlán ocurrió un lahar pre-hispánico que pudo afectar a una población.
- Se sugiere un monitoreo sísmico de las fallas Ixtlán, así como un monitoreo geoquímico constante de las manifestaciones y pozos de la región, indispensable para evaluar el riesgo especialmente de la población de Ixtlán y El Salitre.



## Referencias

AGM (2017) Recursos Geotérmicos de México, Asociación Geotérmica Mexicana. Disponible en: <http://www.geotermia.org.mx/geotermia/> (Consultado: 28 abril 2017).

Alatorre-Zamora, M. A., Campos-Enríquez, J. O., Rosas-Elguera, J. G., Peña-García, L., Maciel-Flores, R. y Fregoso-Becerra, E. (2015) 'Chapala half-graben structure inferred. A magnetometric study', *Geofísica Internacional*, 54(4), pp. 323–342.

Banwell, C. J. y Gómez Valle, R. (1970) 'Geothermal exploration in Mexico 1968–1969', *Geothermics*, 2, pp. 27–40. doi: 10.1016/0375-6505(70)90003-9.

Casarrubias, Z. (2000) Explosión Freática en El Salitre, municipio de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, pp. 1-6.

Del Castillo, L. y Díaz-Pérez, J. (1970) 'Estudio por Sismología de Refracción de una zona Geotérmica', *Anales de Instituto de Geofísica UNAM*, 15, pp. 81–106.

Del Castillo, L., Martínez, A. y Márquez, R. (1970) 'Levantamiento Magnetométrico y Gravimétrico en el área de Ixtlán de los Hervores y Los Negritos, Michoacán', *Anales de Instituto de Geofísica UNAM*, 15, pp. 107–143.

Claire, M. (2016) Energía Geotérmica - Qué es, Fuentes, Usos, Ventajas y Desventajas - ElBlogVerde.com. Disponible en: <http://elblogverde.com/energia-geotermica-que-es-fuentes-usos-ventajas-y-desventajas/> (Consultado: 28 abril 2017).

Cumming, W. (2009) 'Geothermal Resource Conceptual Models using surface exploration data', Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University. Disponible: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SBW/2009/cumming.pdf> (Consultado: 1 junio 2017).

Curewitz, D. y Karson, J. A. (1997) 'Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction', *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 79(3–4), pp. 149–168. doi: 10.1016/S0377-0273(97)00027-9.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Faulds, J. (2011) 'Assessment of Favorable Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin, Western USA', GRC Transactions, 35, pp. 777–783. Disponible en: [http://www.atlasgeoinc.com/wp-content/uploads/Faulds\\_etal\\_Structural\\_Settings\\_GRC\\_2011.pdf](http://www.atlasgeoinc.com/wp-content/uploads/Faulds_etal_Structural_Settings_GRC_2011.pdf) (Consultado: 3 junio 2017).

Faulds, J. E. y Hinz, N. H. (2015) 'Favorable Tectonic and Structural Settings of Geothermal Systems in the Great Basin Region, Western USA: Proxies for Discovering Blind Geothermal Systems', in World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, pp. 1–6. Disponible en: <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/11100.pdf> (Consultado: 2 junio 2017).

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. y Manea, M. (2012) 'The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone', Tectonophysics, 522–523, pp. 122–149. doi: 10.1016/j.tecto.2011.09.018.

Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I. y Rodríguez-Torres, G. M. (2001) 'Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México', Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 18, pp. 37–54. Disponible en: [http://satori.geociencias.unam.mx/18-1/\(2\)Garduno.pdf](http://satori.geociencias.unam.mx/18-1/(2)Garduno.pdf) (Consultado: 29 abril 2017).

Garduño-Monroy, V. H., Spinnler, J. y Ceragioli, E. (1993) 'Geological and structural study of the Chapala rift, State of Jalisco, Mexico', Geofísica Internacional, 32(3), pp. 487–499.

Garduño-Monroy, V. H., Mazzoldi, A., Jiménez-Haro, A., Mastache, E. A., Guevara-Alday, J.A, Olvera-García, E., Maciel, A. E., Bermejo, G., Rentería, A. V., Gaspar-Patarroyo, T. L., Del Razo-González, A. y Gómez-Álvarez, F. (2016) 'Estudio de Prospección del subsuelo mediante el uso de Métodos geofísicos de exploración, en el Centro Recreativo "Géiser de Ixtlán"'. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, pp. 1–125.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Garduño-Monroy, V. H. y Tibaldi, A. (1991) 'Kinematic evolution of the continental active triple junction of the western Mexican Volcanic Belt', *Comptes rendus de l'Académie des sciences Paris*, 312(2), pp. 135–142.

Georgsson, L. S. (2009) 'Geophysical Methods Used in Geothermal Exploration', Presented at Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources, pp. 1–16.

Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T. y Ferrari, L. (2005) 'Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana', *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, (3), pp. 227–283.

Gómez Valle, R., Friedman, J. D., Gawarecki, S. J. y Banwell, C. J. (1970) 'Photogeologic and thermal infrared reconnaissance surveys of the Los Negritos-Ixtlan de los Hervores geothermal area, Michoacán, Mexico', *Geothermics*, 2(2), pp. 381–398. doi: 10.1016/0375-6505(70)90036-2.

Gutiérrez-Negrín, L. C. A., Maya-González, R. y Quijano-León, J. L. (2015) 'Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico', *Proceedings World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia, pp. 1–10. Disponible: [http://www.geothermal-energy.org/publications\\_and\\_services/latin\\_america\\_gateway.html?no\\_cache=1&cid=1066&did=798&sechash=f756eb41](http://www.geothermal-energy.org/publications_and_services/latin_america_gateway.html?no_cache=1&cid=1066&did=798&sechash=f756eb41).

Hasenakal, T., Ban, M. y Granados, H. D. (1994) 'Contrasting volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, Central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones', *Geofísica Internacional*, 33(1), pp. 125–138.

Hiriart, G., Luis, I., Negrín, C. A. G., José, F., Quijano, L., Armando, L., Celis, O., Espíndola, I. S. y Hernández, I. I. (2011) *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*.

Hui, L., Qingjun, Z., Puyuan, T. and Wenguang, H. (2015) 'Technologies and Applications of Geophysical Exploration in Deep Geothermal Resources in China', *World Geothermal Congress 2015*, p. 8.

IGA (2010) *Best Practices Guide for Geothermal Exploration*. Edited by C. C. Harvey y G. Beardsmore.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Luhr, J. F., Kimberly, P., Siebert, L., Aranda-Gómez, J. J., Housh, T. B. y Kysar, G. (2006) 'México's Quaternary volcanic rocks: Insights from the MEXPET petrological and geochemical database', Geological Society of America Special Paper, 402(1), pp. 1–44. doi: 10.1130/2006.2402(01).

Manzella, A. (2000) 'Geophysical Methods in Geothermal Exploration', pp. 1–40. Disponible [http://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/2.1.A\\_ManzellaGeophysicalGeochemicalMeth.pdf](http://geothermalcommunities.eu/assets/elearning/2.1.A_ManzellaGeophysicalGeochemicalMeth.pdf) (Consultado: 31 mayo 2017).

Mazzarini, F., Ferrari, L. e Isola, I. (2010) 'Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacan–Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-Mexican Volcanic Belt', Tectonophysics, 486, pp. 55–64. Disponible en: <http://www.elsevier.com/copyright> (Consultado: 29 Abril 2017).

Van der Meer, F., Hecker, C., Van Ruitenbeek, F., Van der Werff, H., de Wijkerslooth, C. y Wechsler, C. (2014) 'Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review', International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 33, pp. 255–269. doi: 10.1016/j.jag.2014.05.007.

Moeck, I. S. (2014) 'Catalog of geothermal play types based on geologic controls', Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 37, pp. 867–882. doi: 10.1016/j.rser.2014.05.032.

Moeck, I. S., Beardsmore, G. y Harvey, C. C. (2015) 'Cataloging Worldwide Developed Geothermal Systems by Geothermal Play Type', in World Geothermal Congress 2015. Melbourne, Australia, pp. 1–9.

Mortensen, A. K. y Axelsson, G. (2013) 'Developing a Conceptual Model of a Geothermal System', 'Short Course on Conceptual Modelling of Geothermal Systems'. Santa Tecla, El Salvador, pp. 1–10. Disponible: <http://www.os.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-16-29.pdf> (Consultado: 29 mayo 2017).



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Olvera-García, E. (2017) Estudio de geología estructural, mineralógico y de litofacies de los depósitos hidrotermales de San Agustín de Maíz e Ixtlán de los Hervores, Michoacán: Enfocado a la exploración geotérmica. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tesis de Maestría

Ortiz Prieto, I. (2007) Estudio Gravimétrico en la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México. Instituto Politécnico Nacional. Tesis pregrado.

Pasquare, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H. y Tibaldi, A. (1990) 'Migrazione di un Arco Vulcanico Continentale: Dalla Sierra Madre Occidentale all'arco Vulcanico Messicano', Mem. Soci. Geol. It, pp. 939–946.

Pasquare, G., Vezzoli, L. y Zanchi, A. (1987) 'Morphological and structural model of mexican volcanic belt', Geofísica Internacional, 26(2), pp. 159–175.

Polak, B. G., Kononov, V., Prasolov, E. M. y Sharkov, I. V. (1985) 'First Estimations of Terrestrial Heat Flow in the TMVB and adjacent areas based on Isotopic Composition of Natural Helium', Geofísica Internacional, 24(4), pp. 465–476.

Polak, B. G., Prasolov, E. M., Verkhocskiy, A. B., Gonzalez, A., Templos, L. A., Arellano, J. M. and Manon, A. (1982) 'Isotopic Composition and Concentration of Inert Gases in Mexican Hydrothermal Systems', Geofísica Internacional, 21(3), pp. 193–227.

Powell, T. y Cumming, W. (2010) 'Spreadsheets for Geothermal Water and Gas Geochemistry', in Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering-Stanford University. California, pp. 1–16. Disponible en: <https://earthsciences.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2010/powell.pdf> (Consultado: 21 mayo 2017).

Rosas-Elguera, J. (1987) 'Los "bajos estructurales" como indicadores para la exploración geotérmica', Geotermia, 3(1), pp. 19–29.

Rosas-Elguera, J., Alva-Valdivia, L. M., Goguitchaichvili, A., Urrutia-Fucugauchi, J., Ortega-Rivera, M. A., Prieto, J. C. S. y Lee, J. K. W. (2003) 'Counterclockwise Rotation of the



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Michoacan Block: Implications for the Tectonics of Western Mexico', *International Geology Review*, 45(9), pp. 814–826. doi: 10.2747/0020-6814.45.9.814.

Rosas-Elguera, J., Urrutia-Fucugauchi, J. y Maciel F, R. (1989) 'Geología del extremo oriental del graben de Chapala, breve discusión sobre su edad: zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores- Los Negritos, México', *Geotermia*, 5(1), pp. 3–18.

Rosas Elguera, J. y Urrutia-Fucugauchi, J. (1992) 'Magnetoestratigrafía volcánica de la zona geotérmica Ixtlán de los Hervores-Los Negritos, Michoacán, México: Resultados preliminares', *Geofísica Internacional*, 31(4), pp. 431–442. Disponible: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0027067172&partnerID=tZOTx3y1>.

Servicio Geológico Mexicano (2017) Sismotectónica SGM. Disponible en: <http://mapasims.sgm.gob.mx/sismotectonica/> (Consultado: 12 mayo 2017).

Stock, J. M. (1993) 'Tectónica de Placas y la Evolución del Bloque Jalisco, México', *Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, 13(3), pp. 3–9. Disponible: [http://authors.library.caltech.edu/50545/1/Stock\\_1993p3.pdf](http://authors.library.caltech.edu/50545/1/Stock_1993p3.pdf) (Consultado: 30 marzo 2017).

Tello-Hinojosa, E. (1986) 'Características químicas e isotópicas de manantiales termales de las zonas geotérmicas de Ixtlán de los Hervores y Los Negritos, Michoacán', *Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía*, 2, pp. 42–53.

Torres-Cervantes, M. A. (2009) *Historia Ilustrada de Ixtlán de los Hervores*. Ixtlán de los Hervores, México, pp. 1-108.

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. Tesis de Maestría.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

Urbietta-Gómez, J. (2010) 'Exploración Geotérmica somera en Ixtlán de los Hervores, Michoacán, empleando la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D', in Geos, p. 17.

Viggiano-Guerra, J. C. y Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2006) 'Lithology and Hydrothermal Mineralogy of the Well Ixtlán 2, Ixtlán de los Hervores, México', Geothermal Resources Council. Scientific Research Publishing, 30(4), pp. 45–48. doi: 10.4236/ijg.2014.59086.

Viggiano-Guerra, J. C. y Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2007) 'Estudio petrográfico y modelo conceptual preliminar de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores, Michoacán, México', Ingeniería Hidráulica en México, pp. 61–73. Disponible: <http://escire.mx/~tyca02/index.php/tyca/article/view/170> (Consultado: 10 junio 2015).

Waitz, P. (1906) 'Les Geysers D'Ixtlan', en Congreso Geológico Internacional. X Guía de Excursión, pp.1-17.



MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO  
TANIA GASPAR PATARROYO

**Anexos**



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

Localización	Etiqueta	Temp. °C	pH	Li	Na	K	Ca	Mg	SiO <sub>2</sub>	B	Cl	F	SO <sub>4</sub>	HCO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	NH <sub>4</sub>	Suma cationes	Suma aniones		Balance carga
Ixtlán	I1	67	6,8	1,1	500	45	44	3,3	134	10,7	470	4,6	170	80,5	46,0	1,1	25,59	19,89		13%
Ixtlán	I3	77	6,3	1,1	500	32	30	0,4	166	7,1	480	5,4	230	25,6	35,0	2,75	24,41	20,20		9%
Ixtlán	I4	85	7,2	1,1	380	40	40	0	133	12,2	420	5,8	170	43,9	9	7,5	20,12	16,71		9%
Ixtlán	I5	80	7	1,1	380	40	16	0,4	150	11,5	410	5,25	132	41,4	12,0	1,3	18,61	15,67		9%
Ixtlán	I6	68	6,5	1,4	400	40	35	0,4	112	12,5	470	0	210	45,1	46		20,40	19,90		1%
Pozo I	Pozo I	60	7,4	0,6	400	32	32	2,4	95	15,3	440	6	134	54,9	8,0	1,25	20,17	16,68		9%
Ixtlán	I8	91	7,5	0,6	360	40	32	3,3	120	15,3	410	5,7	146	54,9	6	1,5	18,72	16,01		8%
Ixtlán	I9	92	8	0,6	400	40	13	3	97	10,8	410	6	136	39,0		0,35	19,42	15,35		12%
Ixtlán	I10	71	8	0,6	400	32	15	0,4	95	10,2	410	5,7	144	36,6		0,1	19,09	15,46		10%
Ixtlán	I11	92	6,8	0,6	340	20	34	6	84	8,7	420	2,5	235	31,4		10,5	18,16	17,39		2%
Ixtlán	I12	82	7,1	0,6	400	30	18	1	140	12,4	435	5,75	190	44,8		1,45	19,31	17,26		6%
Ixtlán	I13	82	7,4	0,6	400	30	18	2,4	133	10,3	440	5,35	240	37,1		1,8	19,45	18,30		3%
Ixtlán	I14	89	8,1	0,6	400	32	22	0,5	100	11,7	435	5,15	245	42,2		2,15	19,56	18,34		3%
Pozo II	Pozo II	92	8,9	0,6	460	40	16	2	93	7,5	475	5,65	235	26,9	17,0	1,1	22,14	19,60		6%
Ixtlán	I16	68	7,2	0,6	400	35	24	2	104	13,9	437	6,15	200	49,9		1,25	19,81	17,63		6%
Ixtlán	I17	90	8	0,6	400	35	18	1	90	11,6	445	5,5	210	41,6		1,45	19,44	17,90		4%
Ixtlán	I18	88	7,9	0,6	400	35	22	1	90	15,7	445	6,5	210	56,3		1,45	19,64	18,19		4%
Salitre	S19	78	8,1	0,6	400	35	16	6	86	12,4	465	6,2	220	42,9		2,35	19,80	18,73		3%
Salitre	S20	78	8,1	0,6	340	35	15	2	88	12	415	3,8	185	44,8		3,2	16,86	16,49		1%
Salitre	S21	90	8,1	0,6	380	35	15	2	92	12	445	4	200	42,3		1,3	18,50	17,62		2%
Salitre	S22	85	7,7	0,6	380	32	14	3	90	12	445	5,75	250	37,1		2,5	18,52	18,67		0%
Salitre	S23	70	7,3	2,5	1600	90	184	71	128	28,6	1220	13,7	1850	19,1		0,15	87,29	73,97		8%
Salitre	S24	81	7,4	0,6	380	25	16	3	138	11,6	465	5,5	280	37,7		2,15	18,42	19,85		-4%
Salitre	S26	70	7,5	0,5	400	35	21	2	88	11,2	470	5,6	300	44,8		0,3	19,60	20,53		-2%
Salitre	S27	80	7,3	0,5	400	35	19	1	148	12,8	455	5,6	280	58,3		2,15	19,52	19,92		-1%
Salitre	S28	85	7,3	0,5	400	35	17	1	150	8,5	430	5,35	290	37,7		2,75	19,45	19,07		1%
Salitre	S29	87	7,2	0,5	300	17	15	2	123	9,1	350	3	250	39,7		2,75	14,62	15,89		-4%
Salitre	S30	67	6,6	0,5	400	30	16	4	138	12	445	3	320	26,9		1,75	19,46	19,81		-1%
Salitre	S31	91	7	0,5	420	17	37	5	100	10,5	500	3,2	280	112,7		1,75	21,13	21,95		-2%
Salitre	S32	80	7,4	0,5	380	30	16	1	128	11,6	430	5,5	350	44,2		0,65	18,29	20,43		-6%

Anexo 1. Características químicas del agua de manantiales de la zona geotérmica de Ixtlán de los Hervores; datos en ppm tomados de Banwell y Gómez-Valle entre octubre y diciembre de 1968. I (Ixtlán) y S (Salitre). Obsérvese el balance de cargas <15%, indicativo de calidad moderada en los datos.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
**TANIA GASPAR PATARROYO**

Localización	Etiqueta	°C	Conductividad eléctrica $\mu\text{Scm}^{-1}$	PH	Ca	Mg	Na	K	SiO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub>	Cl	B	Isótopos		
													Fecha de muestreo	$\delta\text{D}\%$	$\delta^{18}\text{O}\%$
Salitre	M18	87	2480	6,9	10,7	2,1	420	18,8	211	114	417	14	19/05/1983	-65,20	-6,7
Salitre	M19	60	2560	6,5	12,2	0,5	394	23,2	265	104	442	5			
Salitre	M20	86	2580	7,6	11,2	0,1	382	17,4	199	85	429	13			
Salitre	M21	60	2700	6,8	18,3	0,4	412	29	239	139	455	14			
Salitre	M22	75	2620	6,4	18	0,2	401	26	250	96	442	15	19/05/1983	-60	-4,7
Salitre	M23	60	2720	8,3	12,6	0,1	397	25	235	86	438	14			
Salitre	M24	77	2600	7,6	12,8	0,1	375	20	183	106	408	13	19/05/1983	-63,4	-6
Pozo de agua potable Salitre	P25	43	530	7,5	9,8	5,9	75,5	3	107	205	29	0,86	19/05/1983	-69,4	-8,4
Ixtlán	M26	80	6550	7,1	30	0,97	952	76,8	338	152	961	44,1			
Ixtlán	M27	90	2400	8,1	11	0,04	375	15,1	256	86	408	12,5			
Ixtlán	M28	94	2280	6,7	10	2,2	322	22,6	308	48	391	9,4			
Ixtlán	M29	93	3120	8	9,4	0,6	457	39,4	371	86	553	7,1	19/05/1983	-49,1	-0,66
Pozo N°2 Ixtlán	P30	65	2340	8	10,3	0,04	390	25,7	266	86	417	10,9	19/05/1983	-61,9	-6,4
Noria-Ixtlán	N31	24	1100	8	20,7	2,2	321	7,6	212	380	51	3	19/05/1983	-64,5	-8,1
Pozo de agua potable Ixtlán	P32	50	1560	7,5	20	7,2	251	21,2	156	270	221	5,4	19/05/1983	-63,4	-7,9
El Limón	P33	30	1180	7,7	41,3	18,1	145	10,6	95	312	136	2,6			
Ixtlán	M34	42	1880	6,9	9	0,66	326	13,6	92	89	323	9,5	19/05/1983	-66,6	-7,6
Ixtlán	M35												19/05/1983	-63,5	-7,23

Anexo 2. Características químicas e isotópicas del agua de los manantiales de la ZGIH; datos en mg/l muestreados por Tello-Hinojosa, el 1 de junio de 1982 y el 9 junio de 1983. M (manantial), P (pozo) y N (noria). Obsérvese que no hay datos de sulfatos (SO<sub>4</sub>), por ello no se realizó el balance de cargas.



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

**Anexos Petrografía**

<b>IRX-01</b>			
<b>Localidad:</b> Lava autorbrechada Volcán Colorado			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto andesítico con piroxeno y olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, glomeroporfírica de plagioclasa y olivino, bordes de reacción en olivino, glomeroporfírica de plagioclasa y ortopiroxeno, poiquilítica de olivino en plagioclasa, macla de Carlsbad, cumulo porfírica de plagioclasa, coronítica en ortopiroxeno con borde de clinopiroxeno			
<b>Fenocristales 40% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 60%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b>			
Vitrofidica, vesicular			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	50%	Olivino	25%
		Opacos	5%
		Ortopiroxeno	15%
<b>Observaciones:</b> Posibles xenocristales de olivino que presentan iddingsita en bordes y fracturas, leve textura fluidal, no muy notoria y principalmente de los fenocristales indicativa posiblemente de menor fluides en la lava, tres tamaños en plagioclasas dominantes.			
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>			
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 5%			

<b>IRX-03</b>			
<b>Localidad:</b> Lava Volcán Colorado			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con piroxeno y olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, bordes de reacción de iddingsita, leves texturas sieve, fluidal de fenocristales, poiquilítica de plagioclasa en olivino, cumulo porfírica de plagioclasa			
<b>Fenocristales 40% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 60%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b>			
Vitrofidica, microlítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	65%	Olivino	10%
		Opacos	2%
		Ortopiroxeno	22%
<b>Observaciones:</b> Puesto que la textura fluidal está poco desarrollada puede tratarse de los últimos flujos de lava; el alto porcentaje de plagioclasa (65%) indica mayor diferenciación y un carácter más andesítico en esta muestra.			
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>			
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

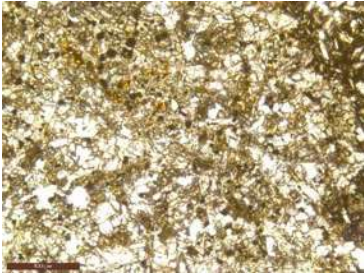
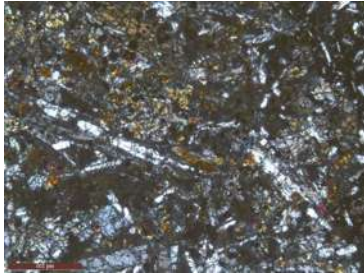
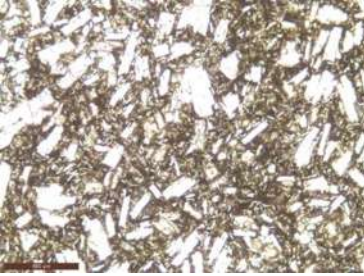
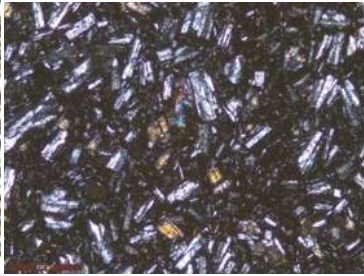
<b>IRX-04</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Encinal (sector SO)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto olivínico			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, <i>sieve</i> en fenocristales de plagioclasas, reabsorción avanzada y bordes de reacción en olivino, poiquilítica de minerales opacos en olivino, poiquilítica de olivino en plagioclasa, glomeroporfírica de plagioclasa y olivino			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, traquílica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino	21%
		Opacos	1%
		Ortopiroxeno	4%
<b>Observaciones:</b> Xenocristales de olivino con reabsorciones muy avanzadas que implican un magma parental básico. Plagioclasas muy tabulares, minerales como el ortopiroxeno e incluso las plagioclasas crecieron a partir del olivino, también olivinos con reabsorciones internas			
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 4%			
Iddingsita	4%		
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>			

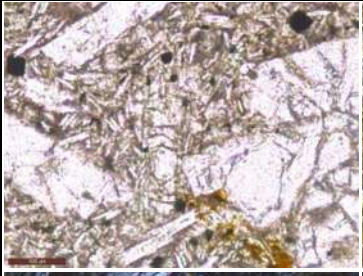
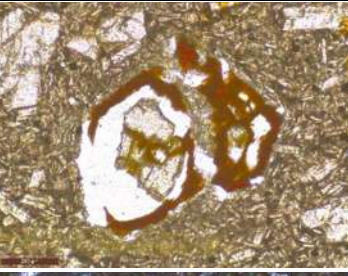

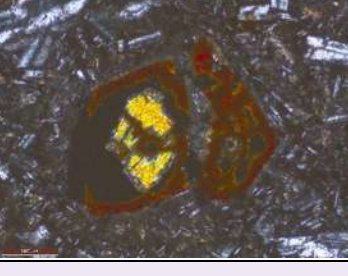
<b>IRX-05</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Encinal (sector SO)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita con piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, desarrollo leve de textura <i>sieve</i> en plagioclasa, textura coronítica en olivino, textura lamellar en ortopiroxeno (lamelas de clinopiroxeno), glomeroporfírica de ortopiroxeno y plagioclasa			
<b>Fenocristales 30% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 70%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, microlítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	60%	Olivino	4%
		Opacos	1%
		Clinopiroxeno (lamelas)	1%
		Ortopiroxeno	33%
<b>Observaciones:</b> Textura coronítica en olivino cambiando a ortopiroxeno así como textura <i>schieller</i> (lamelas de clinopiroxeno en ortopiroxeno) resultan ser un indicativo de procesos de diferenciación magmática.			
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino y ortopiroxeno</i>			



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**

TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-06</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Encinal (sector SW)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto vesicular			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfirítica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, glomeroporfirítica de ortopiroxeno, clinopiroxeno y plagioclasa, plagioclasas con zonación, microcristalina, sieve en pocas plagioclasas			
<b>Fenocristales 40% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 40%</b>			
<b>Vesículas 20%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	60%	Opacos	1%
		Ortopiroxeno	10%
		Olivino	28%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Presencia de líticos, posiblemente incorporados en el momento en que la lava fluyó, las vesículas presentan múltiples tamaños llegando a ser hasta de 4cm en campo evidencia de la cantidad de gases que tenía esta lava; también se observó desvitrificación evidente del vidrio.	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>	

<b>IRX-07</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán La Saucedá			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto con olivino y piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfirítica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, cumuloporfiríticas de plagioclasa, cumuloporfirítica de ortopiroxeno, glomeroporfirítica de plagioclasa y ortopiroxeno, fluidal de fenocristales, bordes de reacción de iddingsita en olivino, textura en corona de ortopiroxenos con bordes de clinopiroxeno			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, microlítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	55%	Ortopiroxeno	25%
		Clinopiroxeno	10%
		Opacos	2%
		Olivino	5%
		Apatito	<1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 2%			
Iddingsita	2%		
		<b>Observaciones:</b> La presencia de xenocristales de olivino denota el carácter básico del magma originario, siendo evidencia de diferenciación magmática, la nueva asociación mineralógica de la roca y la textura coronítica. La presencia abundante de plagioclasa y apatito denotan un carácter más andesítico en esta lava.	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita con olivino, clinopiroxeno y ortopiroxeno</i>	



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-08</b>			
<b>Localidad:</b> Cono cinerítico San Simón			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica de piroxenos			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, ofítica, fluidal de fenocristales de plagioclasa, <i>fiamme</i> , glomeroporfírica de plagioclasa, glomeroporfírica de piroxeno			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, vesicular (1%), microlítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales			
Plagioclasa	60%	Clinopiroxeno	10%
		Ortopiroxeno	30%
<b>Observaciones:</b> Desvitrificación muy notoria, las <i>fiamme</i> incluso denotan sectores más oscuros en luz polarizada plana, los clinopiroxenos parecen originarse apartir de ortopiroxeno			
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno y ortopiroxeno</i>			

<b>IRX-09</b>			
<b>Localidad:</b> Cono cinerítico Las Chivas			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basálto andesítico con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, glomeroporfírica de plagioclasa, olivino y ortopiroxeno, poiquilítica de opacos en olivinos, <i>sieve</i> en plagioclasas, poiquilítica de olivino en plagioclasa			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales			
Plagioclasa	50%	Olivino	40%
		Opacos	1%
		Ortopiroxeno	8%
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i>			
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-11</b>			
<b>Localidad:</b> NW de Ixtlán de los Hervores, Lava Gigante			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, <i>random</i> , poco <i>sieve</i> , bordes de reacción de iddingsita en olivino			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental:</b> Vesicular (1%), amigdalal, vitrofídica, <i>random</i>			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	45%	Olivino	43%
		Opacos	1%
		Clinopiroxeno	10%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%		Minerales de relleno	
Iddingsita	1%	Cuarzo	
<p><b>Observaciones:</b> En general la abundancia de fenocristales es poca. El desarrollo de la textura de bordes de reacción en olivino se encuentra principalmente en los fenocristales, mientras el olivino desarrollado en la matriz no presenta alteración y es más abundante. En la matriz se desarrollaron microcristales de clinopiroxeno (máximo tamaño 300µm), los minerales opacos presenta hábitos cúbicos y de prismas alargados</p>			
<p><i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno y olivino</i></p>			



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-12</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán El Duarte			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, traquitoide, glomeroporfírica de plagioclasa, cumuloporfírica de plagioclasa, olivino y ortopiroxeno, poiquilitica de olivino en plagioclasa, <i>sieve</i> en plagioclasa y bordes de reacción de iddingsita en olivino			
<b>Fenocristales 55% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 45%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental:</b> Vitrofídica, traquítica, pilotaxítica			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	50%	Olivino	30%
		Opacos	1%
		Clinopiroxeno	18%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Los cristales de plagioclasas se presentan en tres tamaños con marcada orientación definiendo textura traquítica, estas tienen especialmente maclas de tipo carlsbad y en menor proporción polisintéticas, minerales opacos con hábito cúbico  <i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita con clinopiroxeno y olivino</i>	

<b>IRX-14</b>			
<b>Localidad:</b> Lava Gigante, sobre la carretera 15D			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, traquítica, bordes y centros de reacción de iddingsita en olivino			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental:</b> Vesicular (1%), amigdalal, vitrofídica, microlítica fluidal, microcristalina			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	60%	Olivino	35%
		Opacos	1%
		Clinopiroxeno	3%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%		Minerales de relleno	
Iddingsita	1%	Cuarzo	
		<b>Observaciones:</b> La textura de centros de reacción es dominante sobre la textura de bordes de reacción. Algunos fenocristales de olivino evidencian procesos de desequilibrio- equilibrio-desequilibrio como sería el caso de un fenocristal con centro y borde de reacción en el mismo cristal; sin embargo los olivinos que se desarrollaron principalmente en la matriz no presentan texturas de reacción, mostrando mayor estabilidad	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno y olivino</i>	



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-15</b>			
<b>Localidad:</b> Cono cinerítico Trompeta			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita de piroxenos			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, <i>sieve</i> poco desarrollado en fenocristales, glomeroporfírica de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno, cumulo porfírica de plagioclasa			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular (1%)			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	50%	Ortopiroxeno	35%
		Clinopiroxeno	14%
		Opacos	1%
		<b>Observaciones:</b> variación de color del vidrio, abundantes glomerocristales y cristales >1.5 mm	
<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita con clinopiroxeno y ortopiroxeno</i>			

<b>IRX-16</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán El Sombrero (sector N)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita de piroxeno y olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, amigdalal, bahías y bordes de reacción en olivino, glomeroporfírica de plagioclasa y olivino			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, fluidal de microlitos			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	55%	Olivino	40%
		Opacos	1%
		Clinopiroxeno	2%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%		Minerales de relleno	
Iddingsita	1%	Carbonatos	1%
<b>Observaciones:</b> Xenocristales de olivino con reabsorciones moderadas que implican un magma parental básico, marcada textura fluidal			
<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno y olivino</i>			

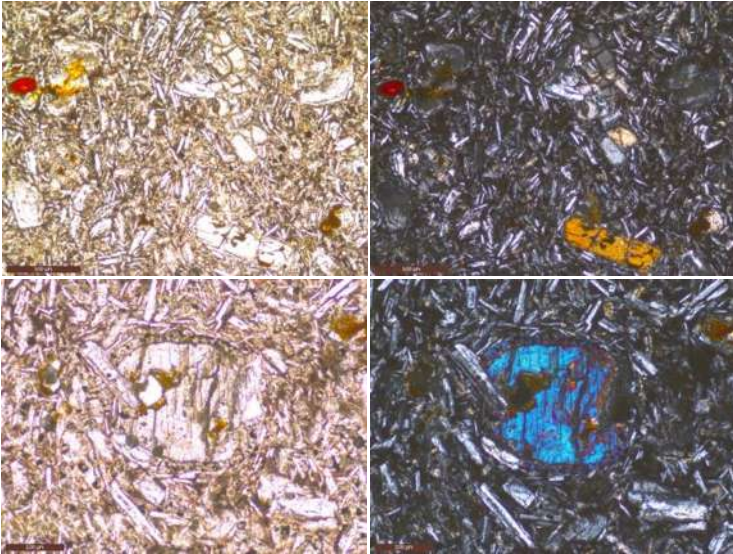


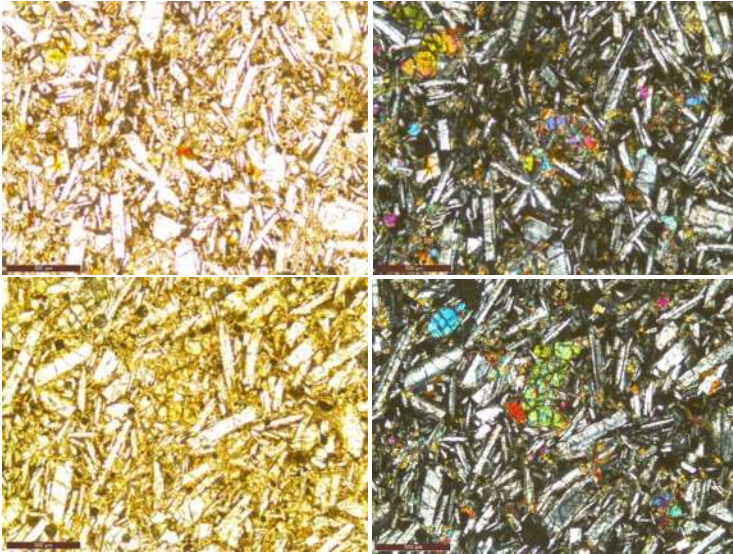
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-19</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán La Mesa			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita con piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, sieve poco desarrollado en fenocristales, glomeroporfírica de plagioclasa, clinopiroxeno y ortopiroxeno, cumulo porfírica de plagioclasa			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	60%	Ortopiroxeno	25%
		Clinopiroxeno	13%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%		Minerales de relleno	
	1%	Carbonatos	1%
<b>Observaciones:</b> sectores con oxidación, piroxenos en matriz, amígdalas rellenas de carbonatos			
<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita con clinopiroxeno y ortopiroxeno</i>			



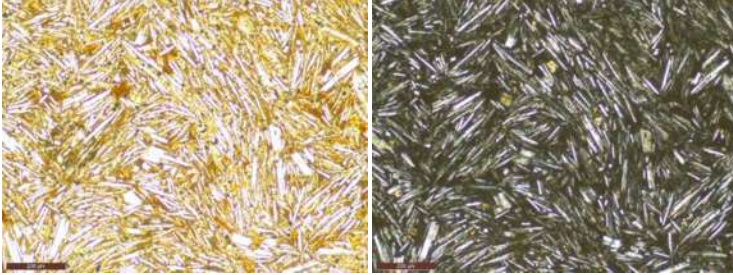
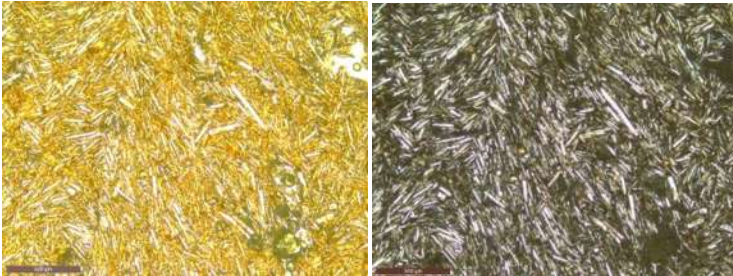
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

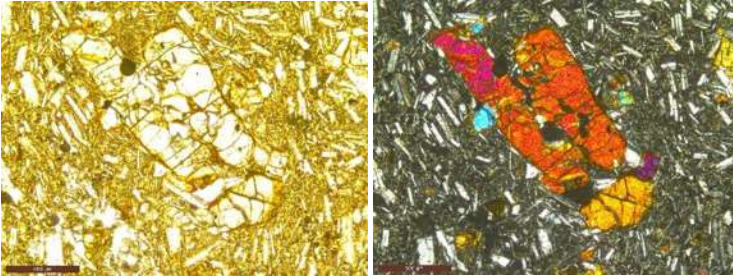
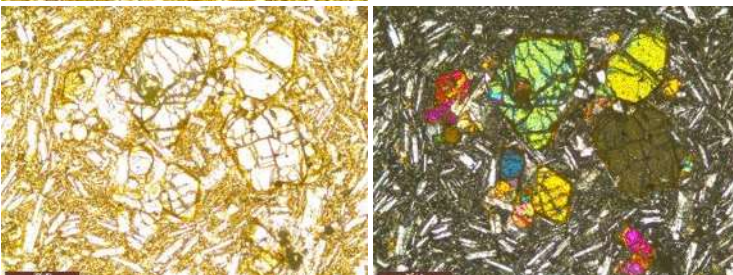
<b>IRX-20</b>					
<b>Localidad:</b> Volcán Encinal (Sector norte, sobre la falla Ixtlán)					
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino					
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, aglomerados de plagioclasa, bordes de reacción de iddingsita en olivino, poiquilíticas de olivino (reemplazados por iddingsita) en piroxenos y plagioclasas, zonación en plagioclasa		<p><b>Observaciones:</b> Texturas poiquilíticas de olivino con bordes de reacción de iddingsita en piroxenos y plagioclasas</p> <p><i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno, ortopiroxeno y olivino</i></p>			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>					
<b>Masa Fundamental 50%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental:</b> Vitrofidica, microlítica fluidal, microcristalina					
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa	65%			Olivino	20%
				Ortopiroxeno	11%
				Clinopiroxeno	2%
				Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>					
Alteración 1%		Minerales de relleno			
Iddingsita	1%	Cuarzo			

<b>IRX-23</b>					
<b>Localidad:</b> Cono de escoria Coruco					
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto olivínico					
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, fluidal de fenocristales de plagioclasa, <i>sieve</i>		<p><i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con ortopiroxeno y olivino</i></p>			
<b>Fenocristales 50% (&gt;100µm)</b>					
<b>Masa Fundamental 50%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental:</b> Vitrofidica					
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa	50%			Olivino	46%
				Opacos	1%
				Ortopiroxeno	2%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>					
Alteración 1%		Minerales de relleno			
Iddingsita	1%				



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-24</b>			
<b>Localidad:</b> Derrame de lava del Cono de escoria Coruco			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita con piroxeno y olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, traquítica, pilotaxítica, bimodal de plagioclasa,			
<b>Fenocristales 49% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 50%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular (1%)			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	76%	Olivino	12%
		Opacos	1%
		Ortopiroxeno	10%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Los ortopiroxenos son mas abundantes en la matriz, sin embargo estan presentes como fenocristales, porcentaje muy alto de plagioclasa que implica mayor diferenciación en esta roca.	
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita con ortopiroxeno y olivino</i>			

<b>IRX-25</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Nogales			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, borde de reacción poco desarrollado, bahías en olivinos			
<b>Fenocristales 35% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 65%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal, glomeroporfírica de olivino y plagioclasa			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa (100-450µm)	70%	Olivino (200-600µm)	28%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Tres poblaciones de olivino, presencia de xenocristales de olivino con texturas de reabsorción	
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>			



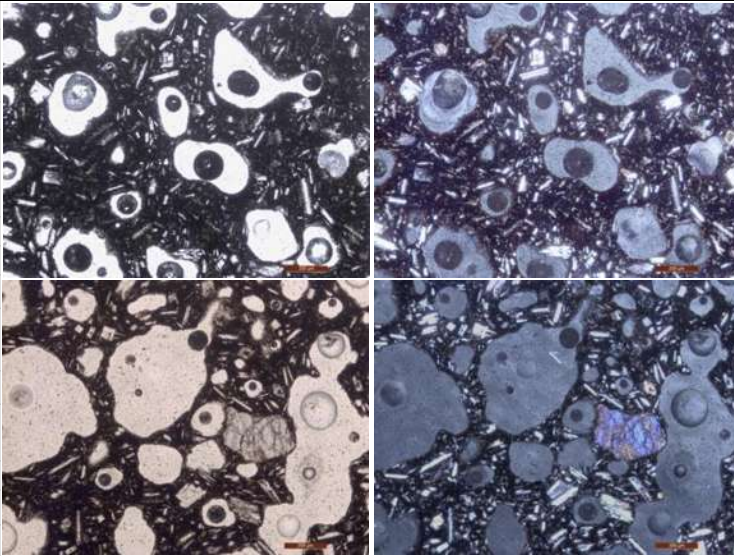
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

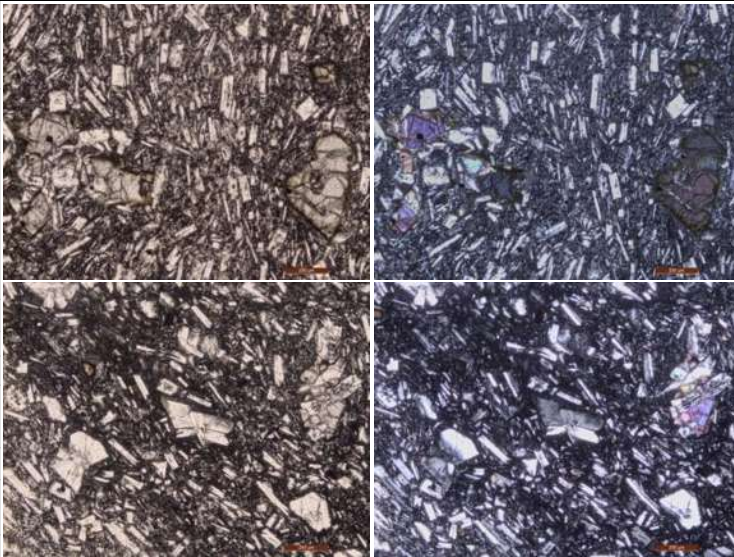
<b>IRX-26</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán La Bolita			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Glomeroporfírica de plagioclasa y clinopiroxeno, cumuloporfírica de plagioclasa, poiquilítica de plagioclasa en clinopiroxeno, poiquilítica de clinopiroxeno en plagioclasa, piroxenos con macla de carlsbad			
<b>Fenocristales 45% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 55%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Microcristalina, intersecal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	79%	Clinopiroxeno	20%
		Opacos	1%
<b>Observaciones:</b> Cuatro tamaños de plagioclasas uno menor de 100µm <i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno</i>			

<b>IRX-27</b>			
<b>Localidad:</b> Cono de escoria (Dique N70E/86NO)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Holocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Traquítica, traquitoide			
<b>Fenocristales 25% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 75%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Traquítica, microlítica fluidal, intergranular			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa (100-450µm)	75%	Olivino	20%
		Opacos	2%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 3%			
Iddingsita	3%		
<b>Observaciones:</b> fracturas rellenas de carbonatos con la misma tendencia, alteración de olivinos a iddingsita <i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>			



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-28</b>			
<b>Localidad:</b> Cono escoria (Dique N50/84SO)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto vesicular			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Holohialina porfírtica			
<b>Otras Texturas:</b> Glomeroporfírtica de olivino, cumuloporfírtica de olivino y plagioclasa			
<b>Fenocristales 15% (&gt;100µm)</b>			
<b>Vesicular 50%</b>			
<b>Masa Fundamental 35%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino	28%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>		<b>Observaciones:</b> Originario de un magma con alto contenido de gas y fluido  <i>Clasificación Composicional según Streckeise,1991: Andesita basáltica vesicular</i>	
Alteración 1%			
	1%		

<b>IRX-30</b>			
<b>Localidad:</b> Lava Volcán Nogales			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírtica			
<b>Otras Texturas:</b> Glomeroporfírtica de olivino y plagioclasa, microlítica fluidal, traquítica, traquitoide, interseccional, reabsorción del olivino, bordes de reacción de iddingsita			
<b>Fenocristales 60% (&gt;100µm)</b>			
<b>Vesículas 5%</b>			
<b>Masa Fundamental 35%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	90%	Olivino	9%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>		<b>Observaciones:</b> Bandeamiento por diferencias en coloración del vidrio, más no en la mineralogía  <i>Clasificación Composicional según Streckeise,1991: Andesita con olivino</i>	
Alteración			
Iddingsita	1%		



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-30A</b>			
<b>Localidad:</b> Lava tardía Volcán Nogales			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Vesicular, intersectal, glomeroporfírica de plagioclasa y olivino, bordes de iddingsita en olivino, reabsorción de olivinos			
<b>Fenocristales 60% (&gt;100µm)</b>			
<b>Vesículas 5%</b>			
<b>Masa Fundamental 35%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	80%	Olivino	8%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Tres poblaciones de olivino, presencia de xenocristales de olivino con texturas de reabsorción	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita con olivino</i>	

<b>IRX-31</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán La Mesa (base)			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita con piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Ortopiroxeno cloritizado, marcada textura fluidal, algunos fenocristales de plagioclasa reemplazados completamente por minerales opacos			
<b>Fenocristales 35% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 65%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	60%	Ortopiroxeno	30%
		Opacos	5%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Cloritización 5%			
		<b>Observaciones:</b> Cloritización principalmente en ortopiroxenos, fracturas con relleno posiblemente de sílice y otros cristales	
		<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita con ortopiroxeno</i>	



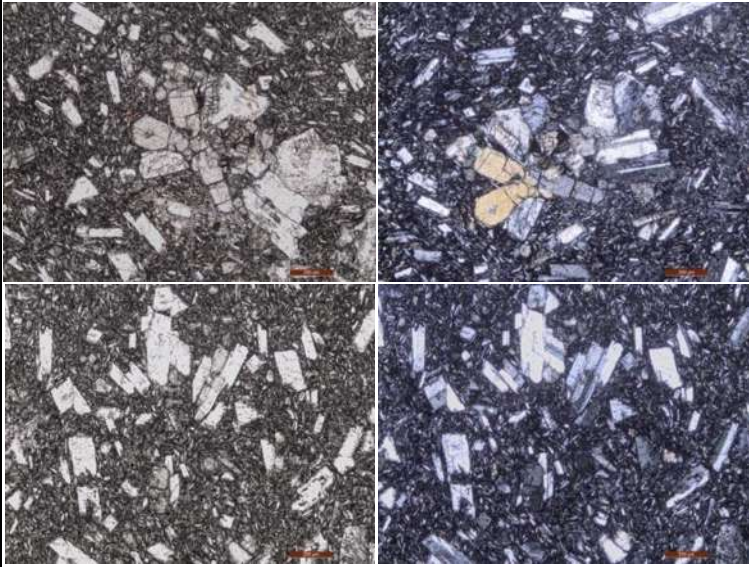
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

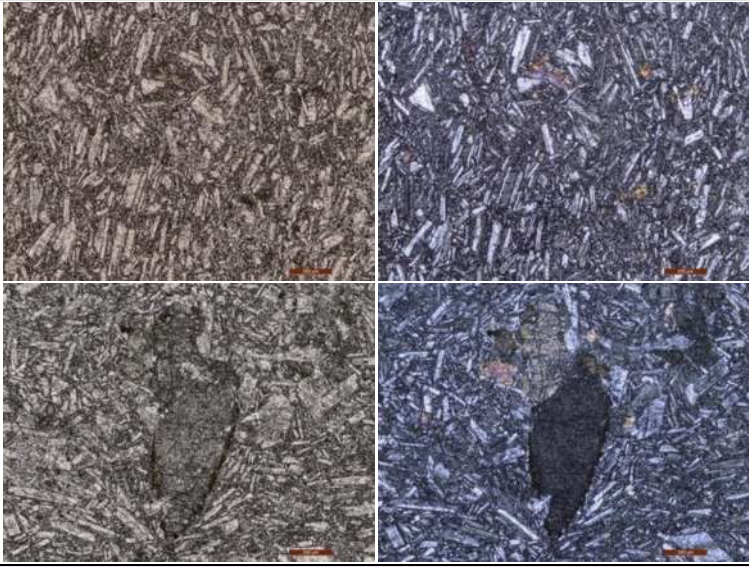
<b>IRX-33</b>					
<b>Localidad:</b> Bloque de lava del Cono Cinerítico Las Chivas					
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita con piroxeno					
ANÁLISIS PETROGRÁFICO					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> fluidal de microlitos y fenocristales de plagioclasa, <i>shiller</i> , glomeroporfírica de piroxenos y plagioclasas, macla en clinopiroxeno					
<b>Fenocristales 55% (&gt;100µm)</b>					
<b>Vesículas 30%</b>					
<b>Masa Fundamental 15%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal					
MINERALOGÍA PRIMARIA					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa	80%			Ortopiroxeno	5%
		Clinopiroxeno	15%		
		Opacos	<1%		
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita con ortopiroxeno y clinopiroxeno</i>					

<b>IRX-34</b>					
<b>Localidad:</b> Volcán La Mesa (Cima)					
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino					
ANÁLISIS PETROGRÁFICO					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> microcristalina, glomeroporfírica de olivino y plagioclasa, microlítica fluidal, bordes de reacción de iddingsita en olivino					
<b>Fenocristales 30% (&gt;100µm)</b>					
<b>Vesículas 10%</b>					
<b>Masa Fundamental 60%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal					
MINERALOGÍA PRIMARIA					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa	85%			Olivino	14%
MINERALOGÍA SECUNDARIA					
Alteración 1%					
Iddingsita	1%				
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>					





**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

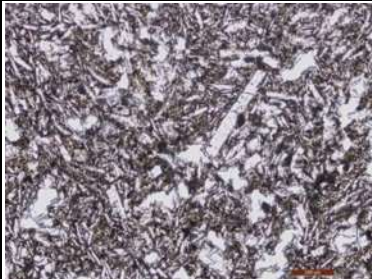

<b>IRX-35</b>					
<b>Localidad:</b> Lava La Luz					
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto andesítico con olivino					
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> Glomeroporfírica de plagioclasa y ortopiroxeno, cumulo porfírica de plagioclasas, sieve, reabsorción de plagioclasas					
<b>Fenocristales 35% (&gt;100µm)</b>					
<b>Masa Fundamental 65%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, vesicular, microlítica fluidal					
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa (100-450µm)	70%			Olivino (200-600µm)	28%
				Clinopiroxeno	3%
				Ortopiroxeno	
				Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>		<b>Observaciones:</b> cuatro poblaciones de plagioclasa donde las mas grandes se caracterizan por zonación, presencia de xenocristales de olivino con texturas de reabsorción			
Alteración 1%					
	1%				
<b>Clasificación Composicional según Streckeise,1991: Andesita con clinopiroxeno y olivino</b>					

<b>IRX-36</b>					
<b>Localidad:</b> Dique Cono Cinerítico La Higuera II					
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto andesítico con olivino					
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>					
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfírica					
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, coronítica de ortopiroxeno con corona de olivino alterada a iddingsita, poiquilítica de olivino en plagioclasa					
<b>Fenocristales 35% (&gt;100µm)</b>					
<b>Masa Fundamental 65%</b>					
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, fluidal de fenocristales y microcristales					
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>					
Minerales esenciales				Minerales accesorios	
Plagioclasa	65%			Olivino	13%
				Ortopiroxeno	20%
				Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>				<b>Observaciones:</b> dos poblaciones de plagioclasa, presencia de xenocristales de olivino con texturas de reabsorción	
Alteración 1%					
Iddingsita	1%				
<b>Clasificación Composicional según Streckeise,1991: Andesita basáltica con olivino y ortopiroxeno</b>					



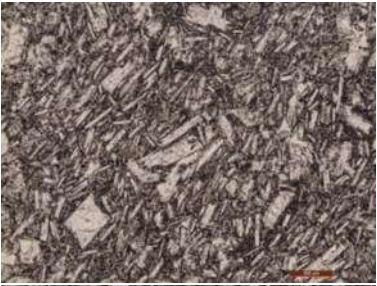
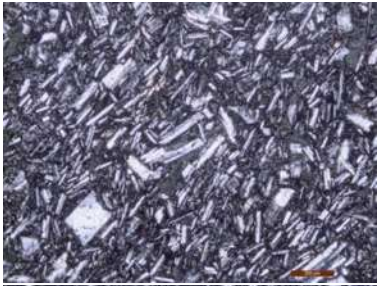
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

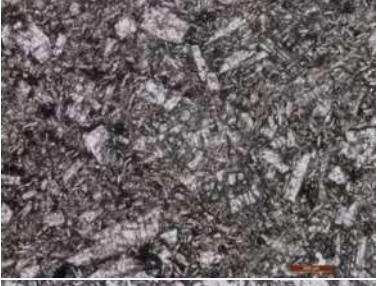
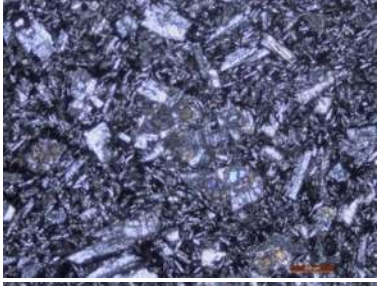
<b>IRX-37</b>			
<b>Localidad:</b> Dique Cono Cinerítico La Higuera II			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Holocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, reabsorción en olivinos, traquitoide, glomeroporfírica de plagioclasa			
<b>Fenocristales 25% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 75%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Holocristalina, microcristalina, fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino	15%
		Opacos	3%
Alteración			
Iddingsita	10%		
Sausuritización	2%		
		<b>Observaciones:</b> Dos poblaciones de plagioclasas tabulares, cristales de olivino con avanzada alteración a Iddingista	
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>			

<b>IRX-39</b>			
<b>Localidad:</b> Dique Cono Cinerítico La Higuera II			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto andesítico con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Holocristalina porfírica			
<b>Otras Texturas:</b> Intersectal, bahías en olivinos, random, pilotaxítica			
<b>Fenocristales 15% (&gt;100µm)</b>			
<b>Vesículas 15%</b>			
<b>Masa Fundamental 70%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofídica, vesicular, microlítica fluidal, glomeroporfírica de olivino y plagioclasa			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino (200-600µm)	28%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>			
Alteración 1%			
Iddingsita	1%		
		<b>Observaciones:</b> Coloración rojiza característica, tanto muestra de mano con en lámina delgada	
<i>Clasificación Composicional según Streckeinse, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>			



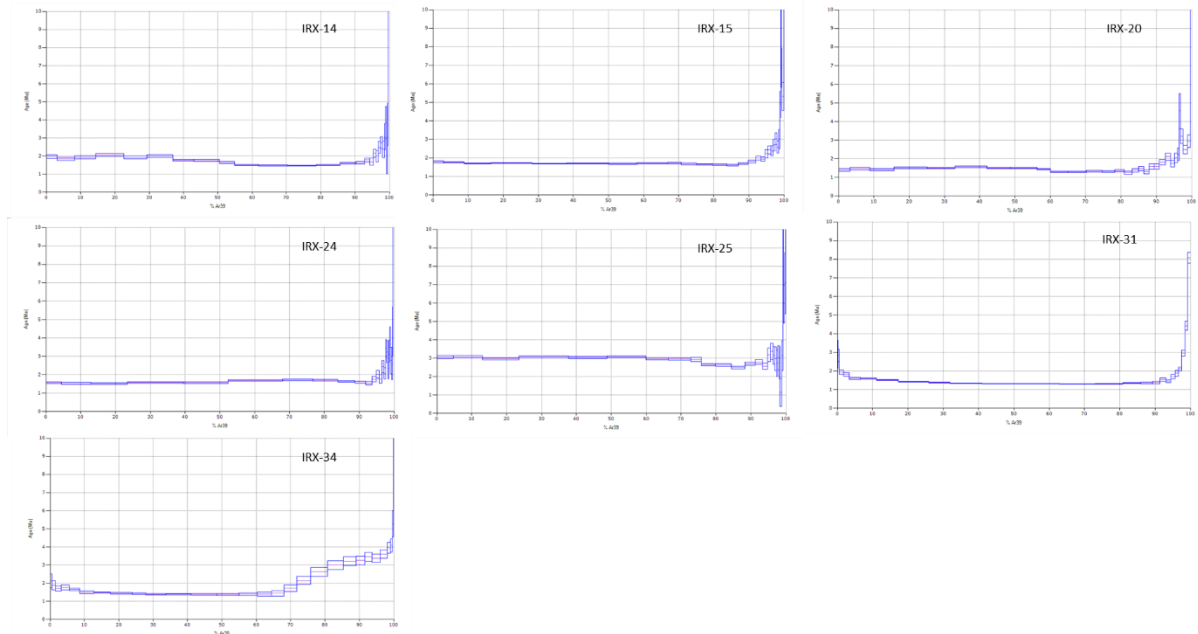
**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO

<b>IRX-40</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán Grande			
<b>Clasificación de Campo:</b> Andesita basáltica con olivino			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfirítica			
<b>Otras Texturas:</b> Traquitoide, cúmulo porfirítica de plagioclasa, <i>sieve</i>			
<b>Fenocristales 35% (&gt;100µm)</b>			
<b>Vesículas 15%</b>			
<b>Masa Fundamental 65%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, microlítica fluidal, pilotaxítica, interseccional			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	70%	Olivino	28%
		Opacos	1%
<b>MINERALOGÍA SECUNDARIA</b>		<b>Observaciones:</b> Tres poblaciones de olivino, leve desarrollo de bordes de iddingsita en olivinos	
Alteración 1%			
<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita basáltica con olivino</i>			

<b>IRX-41</b>			
<b>Localidad:</b> Volcán La Soledad			
<b>Clasificación de Campo:</b> Basalto andesítico con piroxeno			
<b>ANÁLISIS PETROGRÁFICO</b>			
<b>Textura General:</b> Hipocristalina porfirítica			
<b>Otras Texturas:</b> Cumuloporfirítica de plagioclasa, <i>random</i> , piroxenos maclados y con inclusiones de otros clinopiroxenos			
<b>Fenocristales 81% (&gt;100µm)</b>			
<b>Masa Fundamental 15%</b>			
<b>Vesículas 4%</b>			
<b>Texturas de la Masa Fundamental</b> Vitrofidica, vesicular, microlítica fluidal			
<b>MINERALOGÍA PRIMARIA</b>			
Minerales esenciales		Minerales accesorios	
Plagioclasa	85%	Clinopiroxeno	15%
		Opacos	<1%
<i>Clasificación Composicional según Streckeise, 1991: Andesita basáltica con clinopiroxeno</i>			



**MODELO CONCEPTUAL GEOLÓGICO-VULCANOLÓGICO-ESTRUCTURAL DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE  
IXTLÁN DE LOS HERVORES, MICHOACÁN-MÉXICO**  
TANIA GASPAR PATARROYO



Anexo 3. Mesetas de relación entre el contenido de Argón y edad en millones de años (Ma), para cada muestra analizada por el método de fechamiento  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ .

