



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA EN GEOLOGÍA AMBIENTAL

TESIS
**CARACTERIZACIÓN Y MODELACIÓN DE ZONAS
CON POTENCIAL GEOTÉRMICO EN LA PORCIÓN
CENTRAL DEL ESTADO DE HIDALGO A PARTIR
DE SIG Y MÉTODOS GEOFÍSICOS.**

**Que para obtener el título de:
Ingeniera en Geología Ambiental**

PRESENTA

Yerardi Méndez Escamilla

Director:

Dr. Fred Yoan Pérez Corona

Co-Directora:

Dra. Ingrid Árcega Santillán

Comité tutorial:

Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández

Dr. José Cruz Escamilla Casas

Mineral de la Reforma, Hidalgo., México., de Diciembre 2022

| HOJA DE JURADO

Dedicatoria

A mis padres;

A mi mejor amiga y compañera de vida, mi gemela.

Por ser mi compañía en esos días de apatía y de dudas, por su comprensión y cariño pese a mis días de cansancio y sueño constante, por su incondicional apoyo para llegar hasta aquí, por su paciencia al oírme hablar repetidamente sobre lo maravillosa que es esta profesión, por su amor y confianza, y por jamás dejar de creer en mí.

A esta maravillosa e in-perfecta familia dedico mi primer triunfo, el primero de muchos que ustedes me verán lograr y que estoy segura estarán apoyándome como hasta ahora.

Para ustedes.

Y... a mi mejor amigo y amor de mi vida, por motivarme, por recordarme el valor de la perseverancia, y por acompañarme aún en la distancia.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la casa de estudios, la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) que me permitió concluir mi formación universitaria en la Licenciatura en Ingeniería en Geología Ambiental.

Quiero agradecer sinceramente a mi director de tesis el Dr. Fred Y. Pérez Corona, quien creyó en mí y me apoyó en todo momento aun sabiendo que sería un reto dada la situación de pandemia. Ha sido una gran experiencia aprender bajo su tutela. Agradezco sus consejos y el tiempo que me brindó durante estos meses; sencillamente me faltan palabras para agradecer su confianza, su paciencia y enseñanzas que me han llevado a concluir este proyecto y poder obtener mi título profesional. Cada una de sus palabras y lecciones las atesoraré por siempre. Gracias infinitas.

A la Dra. Ingrid Santillán, quien me brindó confianza y seguridad durante mi formación académica y durante la elaboración de esta tesis. Le agradezco su valiosa aportación en este proyecto y por sus atinadas observaciones que me permitieron mejorar mi investigación.

A todos mis profesores de la universidad, especialmente a aquellos que transmitieron su pasión por la geología y por ellos aprendí la vocación y el amor a lo que hago.

Y especialmente agradezco a mis sinodales el Dr. Luis Enrique Ortiz Hernández por sus sinceras y puntuales observaciones, y al Dr. José Cruz Escamilla Casas por enseñarme que los retos son la mejor herramienta para crecer y aprender.

A mi madre, que a pesar de los malos ratos causados por el estrés y cansancio siempre estuvo para mí, animándome y levantándome cada vez que me quise vencer. Mamá, eres increíble, gracias por apoyarme y creer en mi incondicionalmente.

A mi padre, que nunca demostró cansancio para apoyarme y siempre ha estado para mí, a él, que sacrificó infinidad de momentos para que pudiera terminar mis estudios. Papá, gracias por creer en mí y darme energía cuando parecía perderla, no importa la distancia, tú siempre estás conmigo.

A mis hermanas; a la pequeña por animarme y quererme a pesar de mi mal genio y durante mis etapas de frustración; a mi gemela, por ser mi mejor compañía, mi soporte y mi inspiración para salir adelante ante cualquier situación. Sin ellas no hubiera podido lograr muchas cosas. Gracias.

A mis amigos y amigas: Izamar, Erika, Susan, Mire, Anastasia, Pablo, Pepe, Manu, “Jarillo”, “Capi”, Hervey, Marco, Benjamín, Alex, Arturo, Ricardo y Sebastián, por cada aventura en la universidad llena de alegría, risas, ratos de ocio y charlas existencialistas que nos volaban el tiempo, por esos cafés, cervezas y viajes que jamás se olvidarán. Gracias por su amistad y por lo bello de coincidir. Los quiero.

Y a mi alma gemela, mi mejor amigo, por acompañarme en cada momento de este proyecto sin atisbo de duda, por motivarme, por no dejarme rendir y por creer en mí más de lo que yo lo hacía. A ti Daniel, gracias.

A ti mujer de ojos pequeños y grandes sueños,

a ti que nunca te rendiste, gracias.

CONTENIDO

RESUMEN	1
CAPÍTULO I	2
GENERALIDADES	2
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. OBJETIVO GENERAL	3
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4. JUSTIFICACIÓN	3
1.5. ANTECEDENTES	4
CAPÍTULO II	5
2.1. GEOTERMIA	5
2.1.1. <i>Sistemas geotérmicos</i>	5
2.1.1.1. <i>Clasificación de sistemas geotérmicos</i>	6
a) <i>Sistemas geotérmico hidrotermal</i>	6
b) <i>Sistemas geo-presurizados</i>	6
c) <i>Sistemas de roca seca-caliente.</i>	6
2.1.2. <i>Reservorio geotérmico</i>	7
2.1.3. <i>Provincia geotérmica</i>	7
2.1.4. <i>Play petrolero</i>	7
2.1.5. <i>Play geotérmico</i>	7
2.1.5.1. <i>Clasificación de “play”</i>	8
a) <i>Convectivo</i>	8
b) <i>Conductivo</i>	9
2.1.6. <i>Recursos geotérmicos</i>	9
2.1.7. <i>Yacimiento geotérmico</i>	10
2.1.7.1. <i>Clasificación de yacimientos geotérmicos</i>	10
2.2. GEOFÍSICA	10
2.2.1. <i>Métodos geofísicos potenciales</i>	10
2.2.1.1. <i>Magnetometría</i>	11
2.2.1.2. <i>Levantamiento aero-magnético</i>	11
2.2.1.3. <i>Anomalía magnética</i>	11
2.2.1.4. <i>Filtros y/o algoritmos de realce</i>	12
a) <i>Reducción al polo</i>	12
b) <i>Primera derivada</i>	12
c) <i>Señal Analítica</i>	13
2.3. MÉTODO DE SUMA PONDERADA	13
2.3.1. <i>Media aritmética ponderada</i>	13
2.3.2. <i>Álgebra de mapas</i>	14
CAPÍTULO III	14
3.1. GEOLOGÍA REGIONAL	14
3.1.1. <i>Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)</i>	14
3.1.2. <i>Complejo volcánico de Tulancingo-Acapulco</i>	15
3.1.3. <i>Caldera de Chichicauitla</i>	15
3.2. SECTORES DEL “PLAY” GEOTÉRMICO	16
3.2.1. <i>Sector occidental del “play” geotérmico</i>	16

3.2.2.	<i>Sector central del “play” geotérmico</i>	17
3.2.3.	<i>Sector oriental del “play” geotérmico</i>	19
3.3.	GEOMORFOLOGÍA	22
CAPÍTULO IV		26
4.1.	DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
4.1.1.	<i>Localización</i>	26
4.2.	DEFINICIÓN DE VARIABLES	28
4.2.1.	<i>Geomorfología</i>	28
4.2.1.1.	<i>Análisis geomorfológico</i>	28
4.2.2.	<i>Geología</i>	30
4.2.3.	<i>Crono-estratigrafía</i>	30
4.2.4.	<i>Flujo de calor</i>	31
4.2.5.	<i>Geofísica</i>	34
4.3.	RECLASIFICACIÓN	41
4.4.	MÉTODO DE SUMA PONDERADA Y ÁLGEBRA DE MAPAS	42
4.5.	DELIMITACIÓN DEL SECTOR SURORIENTAL	48
CAPÍTULO V		62
5.1.	MÉTODO MAGNÉTICO	62
5.1.1.	<i>Campo Magnético</i>	63
5.2.	INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS	79
5.2.1.	<i>Lineamientos Magnéticos.</i>	79
5.2.2.	<i>Dominios Aero-Magnéticos (DAM)</i>	83
5.2.2.1.	<i>Dominios Aero-Magnéticos Superficiales</i>	83
5.2.3.	<i>Continuaciones Ascendentes y Dominios Aero-Magnéticos (DAM) Regionales Profundos del CMRP</i>	87
5.2.4.	<i>Continuaciones Ascendentes y Dominios Aero-Magnéticos (DAM) Regionales-Profundos de la Señal Analítica (SA).</i>	89
5.3.	MODELOS MAGNÉTICOS	94
5.3.1.	<i>Sección C-C'</i>	97
5.3.2.	<i>Sección D-D'</i>	99
5.4.	RECONSTRUCCIÓN DEL VULCANISMO QUE DIÓ ORIGEN A LA CALDERA CHICHICUAUTLA A PARTIR DE LA MODELACIÓN MAGNÉTICA Y LA HISTORIA VOLCÁNICA DE LA CALDERA TULANCINGO-ACOCULCO.	102
5.4.1.	<i>Unidades litológicas del complejo volcánico de Chichicauutla</i>	102
5.4.2.	<i>Origen y evolución de la caldera Chichicauutla</i>	105
5.5.	POTENCIAL HÍDRICO	109
5.5.1.	<i>Acuíferos de la zona de estudio</i>	111
a)	<i>Cuautitlán- Pachuca</i>	111
b)	<i>Valle de Tulancingo</i>	112
5.6.	MODELO CONCEPTUAL	112
CAPÍTULO VI		116
6.1.	CONCLUSIONES	116
6.2.	RECOMENDACIONES	118

FIGURAS

Figura 1. Litología, geología estructural y aparatos volcánicos del “play” geotérmico.....	21
Figura 2. Geomorfología descrita por medio del tipo de relieve encontrado en el área delimitada como “play” geotérmico.....	23
Figura 3. Mapa de provincias y sub-provincias fisiográficas del área de estudio.....	25
Figura 4. Mapa de localización del área de estudio, muestra la delimitación del “play” geotérmico, así como los municipios que abarca.	27
Figura 5. Perfil de elevación de la Caldera de Chichicauhtla con orientación N-S.	29
Figura 6. Mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos en México (tomada de Prol-Ledesma et al., 2018)...	32
Figura 7. Mapa de flujo de calor y manifestaciones geotérmicas del estado de Hidalgo.	33
Figura 8. Mapa de campo magnético reducido al polo.....	35
Figura 9. Mapa de Primera Derivada Vertical.....	36
Figura 10. Mapa de Derivada Fraccional Vertical de orden 0.25.	37
Figura 11. Mapa pseudo-gravimétrico.	39
Figura 12. Modelo tridimensional del campo magnético reducido al polo del “play” geotérmico	40
Figura 13. Ejecución de la fórmula 9 por medio de álgebra de mapas.	45
Figura 14. Mapa de potencial geotérmico en la porción central del Estado de Hidalgo, México.	46
Figura 15. Modelo de índice de potencial geotérmico denotando los sectores NW y SE del Estado de Hidalgo, México.....	47
Figura 16. Delimitación del sector suroriental (SE) reconocido como uno de los sitios potenciales para prospección geotérmica en el estado de Hidalgo, México.	49
Figura 17. Ubicación de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 de la zona geotérmica de Acapulco realizados por CFE.	50
Figura 18. Mapa de estructuras volcánicas (tomado de Solana-López, 2010).	51
Figura 19. Mapa de localización de las secciones geológicas de referencia para el conocimiento del subsuelo en la región de Tulancingo (tomado de Lesser et al., 2007).	52
Figura 20. Sección geológica esquemática 2-2' del acuífero de Tulancingo (modificada de Lesser et al., 2007).	52
Figura 21. Columna litológica del pozo EAC-1 (recuperada de López-Hernández, 2009).....	53
Figura 22. Descripción simplificada de la litología del pozo EAC-1 (tomado de Avendaño-Cortes, 2017).	54
Figura 23. Unidades litológicas y descripción petrográfica simplificada del pozo EAC-2 (tomada de Avendaño-Cortes, 2017).	54
Figura 24. Vista en microscopio del Granito de hornblenda, recuperado a 1614 m de profundidad en el pozo EAC-1. 2.5X, NX (tomada de López-Hernández, 2009).....	55
Figura 25. Ignimbrita Los azufres 10X. NX. Recorte del pozo EAC-1 a 370 m de profundidad (tomada de López-Hernández, 2009).....	55
Figura 26. Sección esquemática del área de estudio y los pozos EAC-1 y EAC-2 donde se muestra la relación estratigráfica de las unidades litológicas que integran a cada una de estas zonas.....	57
Figura 27. Perfil topográfico de la sección A-A' de la figura 29.	59
Figura 28. Perfil topográfico de la sección B-B' en la figura 29.....	59
Figura 29. Geología de la zona de estudio denominada sector SE (suroriental) y secciones geológicas.	60
Figura 30. Capas internas de la Tierra: Modelo químico o estático (tomada de Tarbuck y Lutgens, 2005).....	64
Figura 31. Campo magnético de la Tierra representado por las líneas de fuerza magnéticas salientes del polo Norte (SM), el eje magnético y el plano de órbita ecuatorial (tomada de Calcina, 2009).....	64
Figura 32. Componentes del campo magnético terrestre (tomada de Lanza y Meloni, 2006).	66
Figura 33. Mapa de Campo Magnético Residual (CMR).....	71
Figura 34. Mapa de Reducción al Polo.	72
Figura 35. Mapa de Primera Derivada Vertical.....	73

Figura 36. Mapa de derivada fraccional de orden 0.25.....	74
Figura 37. Mapa de derivada fraccional de orden 0.75.....	75
Figura 38. Mapa de Señal Analítica.	76
Figura 39. Mapa de ángulo TILT.	78
Figura 40. Lineamientos identificados en el mapa de Fase TILT (FT).	80
Figura 41. Orientación preferencial de los lineamientos identificados con FT por medio de una roseta de direcciones, señalando la tendencia principal en color rosa.	80
Figura 42. Lineamientos identificados en el mapa de Primera Derivada Vertical (1DV).	82
Figura 43. Orientación preferencial por medio de una roseta de direcciones de los lineamientos identificados en la primera derivada.	82
Figura 44. Dominios Aero-magnéticos identificados en el mapa de Reducción al Polo.	84
Figura 45. Dominios identificados en el mapa de Fase TILT.	85
Figura 46. Dominios identificados en el mapa de primera derivada vertical.	86
Figura 47. Dominios identificados en el mapa aero-magnético por continuación ascendente a 100 m.	87
Figura 48. Dominios identificados en el mapa aero-magnético por continuación ascendente a 500 m.	88
Figura 49. Dominios identificados en el mapa aero-magnético por continuación ascendente a 1000.	89
Figura 50. DAM en anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente a 100 m.	90
Figura 51. DAM anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente a 500 m.	91
Figura 52. DAM identificados en las anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente de 1 km.	92
Figura 53. Modelo 3D donde se muestran los cambios en la amplitud y delimitación de los dominios a través de continuaciones ascendentes del CMRP.	93
Figura 54. Modelo 3D donde se muestran los cambios en la amplitud y delimitación de los dominios a través de continuaciones ascendentes del campo de SA.....	94
Figura 55. Localización de los perfiles geológico-geofísicos.	95
Figura 56. Perfil magnético de la sección geológica C-C' en donde se observa un ajuste de la curva magnética calculada con respecto a la observada, mostrando un error de 6.45%.	98
Figura 57. Perfil magnético de la sección geológica D-D' en donde se observa un ajuste de la curva magnética calculada con respecto a la observada, mostrando un error de 7.43%.	101
Figura 58. Columna estratigráfica de la zona de Chichicautla.	105
Figura 59. Reconstrucción geológica de los eventos genéticos de la caldera de Chichicautla.	108
Figura 60. Mapa hidrológico de la zona de estudio.	110
Figura 61. Modelo Conceptual del posible Sistema Geotérmico existente en la porción SE del estado de Hidalgo. Vista desde el Norte hacia el SE.....	114

TABLAS

Tabla 1. Categorías geomorfológicas para la zona propuesta como “play” geotérmico.	28
Tabla 2. Clases para la reclasificación de las variables que permiten la formación de un “play” geotérmico. .	42
Tabla 3. Ponderaciones de las variables.	44
Tabla 4. Susceptibilidades magnéticas de rocas comunes (Catalán et al., 2016).	67
Tabla 5. Susceptibilidades magnéticas y promedios de algunas rocas (España-Bernardino, 2017).	68
Tabla 6. Susceptibilidades magnéticas de rocas sedimentarias (Pérez-Corona, 2011).	68
Tabla 7. Susceptibilidades magnéticas de rocas ígneas analizadas por Aragón et al. (2009).	68
Tabla 8. Valores magnéticos y nombre de las rocas del área de estudio.	96
Tabla 9. Valores del campo magnético terrestre durante el año 1996 tomado de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).....	96

RESUMEN

Los recursos geotérmicos del estado de Hidalgo son conocidos por sus distintas manifestaciones superficiales representadas por manantiales superficiales de calor y se limitan al uso directo de la balneología empleada en el turismo. Sin embargo, esta aplicación de la geotermia no muestra realmente el potencial del recurso en el estado, debido a la falta de información sólida acerca del verdadero potencial energético que puede tener el territorio Hidalguense.

En el presente trabajo se elaboró un mapa que muestra las zonas viables para la exploración geotérmica considerando aquellas variables que favorecen la formación de sistemas geotérmicos. Además, se realizó un modelo conceptual de la zona con mayor probabilidad de albergar potencial geotérmico, basándose en los resultados obtenidos del procesamiento de datos geofísicos que señalan cuerpos asociados a posibles fuentes de calor.

Se realizó un análisis espacial considerando las variables: geología, geomorfología, flujo de calor, cronoestratigrafía y geofísica, las cuales, se trabajaron con álgebra de mapas utilizando el método de suma ponderada basado en la asignación de clases y ponderaciones, el cual, permitió elaborar un mapa de índice de valores con un rango de menor a mayor potencial. A partir del índice de valores se seleccionó una de las zonas favorables para exploración, el sector SE, una de las zonas en las que se encuentran los valores de flujo de calor más altos. La metodología propuesta tiene mayor robustez en sus resultados dependiendo del número de variables y detalle de estas, por lo que en este trabajo se utilizaron variables de orden regional a las que se tuvo acceso.

Posteriormente, se realizó un análisis de datos aero-magnéticos con el objeto de delimitar los cuerpos geológicos que producen las anomalías magnéticas y que se asocian a las fuentes de calor en los sistemas geotérmicos. Se aplicaron filtros de realce para la interpretación de lineamientos geofísico-estructurales asociados a posibles fallas y/o fracturas, así como dominios aero-magnéticos que se relacionan a contactos geológicos y/o estructuras volcánicas del área.

Finalmente, se caracterizó la estructura volcánica principal de la zona (la caldera Chichicuautila) a partir de la integración de la información aero-magnética y la geología con la cual se elaboró el modelo geológico conceptual para la interpretación del sistema geotérmico ubicado al sur de Tulancingo y en el límite poniente del complejo volcánico de Tulancingo-Acochulco. Concluyendo que el sistema geotérmico de la caldera Chichicuautila se presenta con un comportamiento transicional debido a la baja disponibilidad de agua del acuífero y como un sistema de roca seca definido como “no convencional”.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

El estado de Hidalgo pertenece a una de las regiones geográficas cuya capacidad generativa de energía geotérmica está relacionada al vulcanismo reciente de la Faja Volcánica Transmexicana. Hasta el momento, el potencial geotérmico se limita a la zona norte del estado, específicamente al municipio de Tecozautla, lugar donde estuvo instalada la primera planta geotérmica del país y de América; la planta de Pathé (Hiriart, 2017). En México, Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha inventariado más de 1380 manifestaciones geotérmicas de las cuales, Pathé cubre aproximadamente un 20% con características de sistemas de media o alta entalpía ubicadas en una zona de intersección de fallas regionales N-S y E-W, que controlan de igual manera la distribución de las alteraciones (Canet *et al.*, 2021).

Sin embargo, existen otras áreas de interés dentro del estado que se consideran relevantes para la búsqueda de recursos geotérmicos. Estas se reconocen por las manifestaciones superficiales de calor y otras características anómalas en el territorio Hidalguense, las cuales al ubicarse y reconocer que presentan cierto lineamiento preferencial y similitud de características geológicas, es posible decir que la zona norte del estado podría no ser la única con este potencial. Con la información que ha generado el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) en mapas de flujo de calor y la categorización del gradiente geotérmico en provincias geotérmicas, se ha podido implementar esta información como principio de este trabajo; además de aplicar el término de “*play*” geotérmico como un concepto “base” introducido por Prol-Ledesma y Morán-Zenteno (2019) para la caracterización de áreas regionales con potencial geotérmico en zonas más locales y poco exploradas en el área de estudio.

Por tal motivo, para resolver la incógnita sobre la existencia de potencial geotérmico a través del concepto “*play*” geotérmico se ha implementado una metodología que consta de dos etapas: la primera consiste en un análisis cualitativo a partir de álgebra de mapas ejecutado mediante SIG y en la segunda se emplea la magnetometría, es uno de los métodos geofísicos idóneo para la búsqueda de cuerpos anómalos asociados a intrusivos ocultos o fallas, y estimación de profundidades, (Georgsson, 2013). Con la primera etapa se obtuvo un índice de potencial geotérmico aplicando la técnica de suma ponderada y la categorización de variables a partir de archivos ráster, y con el cual se delimitó a detalle el área de interés: el sector suroriental. En la segunda etapa se utilizaron datos aero-magnéticos (obtenidos por SGM) para medir las respuestas anómalas magnéticas de las rocas a partir de diferentes filtros de realce y definir los cuerpos o “fuentes” generadoras de calor en un sistema geotérmico existente en la zona.

Debido a que el presente proyecto de investigación es una primera fase en un trabajo de exploración, se ha diseñado también un modelo esquemático del sistema geotérmico definido con los resultados del procesado magnético y la primera etapa de definición de la zona más prometedora para la búsqueda de recursos geotérmicos en el estado de Hidalgo, basándose en la génesis de la estructura volcánica principal del área de estudio: la caldera de Chichicuautila. La interpretación magnética y geológica aportará información nueva para el sector energético y académico a futuro, considerando que este trabajo tiene como finalidad promover el interés por nuevas áreas para la exploración de energía geotérmica en el estado y en el país.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Definir y modelar sitios potencialmente geotérmicos, utilizando SIG y métodos geofísicos potenciales para la futura exploración de recursos geotérmicos en el estado de Hidalgo.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Delimitar las zonas con mayor probabilidad de poseer altos valores en el gradiente geotérmico.
- b. Identificar las fuentes de calor de origen volcánico por medio de magnetometría.
- c. Proponer un modelo geológico-conceptual del área más prometedora para la búsqueda de un posible sistema geotérmico.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La escasez de información sobre los recursos geotérmicos en el estado de Hidalgo presenta un problema cultural y económico, puesto que el potencial que presentan estos recursos en las diversas fuentes termales podría llegar a aprovecharse satisfactoriamente si se conocieran sus ventajas. Existen pocas investigaciones dirigidas a la exploración geotérmica en Hidalgo, por esta razón, se pretende exponer el potencial geotérmico que se encuentra en la región por medio de la identificación de estructuras volcánicas que puedan asociarse a las fuentes de calor utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y métodos geofísicos de exploración.

Los SIG son herramientas muy útiles para representar de manera gráfica los factores de relevancia para la identificación de un posible “play” geotérmico. Estos factores son la geología, la geomorfología, la cronoestratigrafía, la geofísica y el flujo de calor contenido en el subsuelo y que se manifiesta en la superficie a partir de fuentes termales, pozas de lodo caliente, géiseres y vapor.

En el presente trabajo se utilizan datos de flujo de calor (datos de Prol-Ledesma y Morán-Zenteno, 2019) que muestran la distribución térmica en la zona de estudio, siendo herramientas cualitativas útiles, sin embargo, los análisis geomorfológicos, geológicos y geofísicos también son necesarios para corroborar y fundamentar la naturaleza de las anomalías de calor. Además, esta información permite inferir la dimensión del yacimiento geotérmico, que es el más importante para los desarrolladores de la geotermia, por tal motivo se deben complementar con métodos de mayor precisión para determinar el tamaño de la fuente de calor y así reducir la incertidumbre en las exploraciones, siendo la geofísica uno de los métodos más asequibles para la búsqueda de este recurso.

Con los resultados de esta investigación se expondrán las áreas con mayor potencial para el aprovechamiento geotérmico, facilitando la búsqueda de dichos recursos y así complementar la etapa de prospección geotérmica en el estado de Hidalgo para reducir los riesgos de inversión en etapas posteriores.

1.5. ANTECEDENTES

El historial geotérmico del estado de Hidalgo comienza con el descubrimiento de fuentes termales en el norte del territorio desde épocas paleolíticas. Antiguas civilizaciones han aprovechado la geotermia en sus manifestaciones térmicas más comunes: las aguas termales (Vergara-Hernández, sf) para su desarrollo y evolución. Desde los inicios se aprovecharon con fines turísticos en el desarrollo de balnearios y de recreación, sin embargo, las sociedades tienden a evolucionar y a demandar cada vez más recursos, más necesidades y sobre todo tienden a buscar la comodidad.

Por esta razón, la energía geotérmica comenzó a ser vista como algo más que sólo una ducha caliente a la intemperie, debido al potencial que contenía esta energía a partir de su forma tan característica de manifestarse en superficie. En el año de 1904 en Larderello, Italia surgió la primera planta geotérmica del mundo, diseñada para generar electricidad a base de la fuerza de los flujos térmicos ascendentes, los cuales provocan el movimiento de una turbina generando electricidad (Parri y Lazzeri, 2016). De este modo pasó de ser la energía geotérmica de un simple jacuzzi natural a una bombilla eléctrica con propiedades lumínicas suficientes para dejar de lado las lámparas a base de combustibles fósiles.

55 años después, la innovadora técnica de convertir los fluidos termales en energía eléctrica llegó a América, específicamente a la localidad de Pathé en el estado de Hidalgo, México (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010). Desde entonces y hasta la actualidad, el campo de exploración hacia la geotermia se extendió, estableciendo hasta el momento 5 plantas geotérmicas en todo el país con una capacidad neta de 950 MW (Gutiérrez-Negrín, 2019). México presenta un gran potencial geotérmico, pero las limitantes tecnológicas y económicas han frenado el desarrollo de este recurso.

Anteriormente, los campos geotérmicos de mayor rentabilidad eran aquellos que se conocen como sistemas geotérmicos hidrotermales, pero están limitados a un ambiente tectónico particular y no son muy comunes. Por tal motivo se han desarrollado técnicas que permitan ver las ventajas de los recursos de temperatura baja a media, que son los más abundantes (Almirudis, Guevara, Santoyo, Torres-Alvarado, Paz-Moreno, 2015). Estas técnicas incluyen mapas cualitativos, mostrando las zonas potenciales a detalle, como por ejemplo el mapa de flujo de calor y provincias geotérmicas de Prol-Ledesma y Morán-Zenteno (2019) basado en la definición de “*play*” geotérmico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. GEOTERMIA

Del griego *geo* (Tierra) y *thermos* (calor) que en sintonía significan calor de la Tierra. El Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo) define la geotermia como “la energía térmica que se produce y/o se almacena en el interior de nuestro planeta” (CeMIEGeo, 2014-2019).

Esta energía se manifiesta en la superficie de la Tierra de distintas maneras, en zonas donde el flujo de calor es anómalo, por ejemplo, en las aguas termales, géiseres, pozas de lodo, y fumarolas. Esta energía térmica se origina a partir de dos fuentes, una es por la transferencia del calor desde el núcleo del planeta. La otra es por el calor generado durante el proceso de decaimiento radiactivo de algunos minerales como el Uranio, Torio y Potasio presentes en la corteza superficial de la Tierra (Zobin, 2017).

2.1.1. Sistemas geotérmicos

Zobin (2017) describe un sistema geotérmico como una transferencia de calor natural dentro de un volumen confinado de la corteza terrestre donde el calor se transporta desde una fuente de calor a un disipador de calor, generalmente a la superficie libre.

El ministerio de energía de Colombia explica que un sistema geotérmico está formado por un reservorio, una fuente de calor y un fluido.

El CeMIEGeo (2014-2019) lo describe como un yacimiento, una configuración única y específica del terreno en el que el calor está definido por el medio en el que se transmite a la superficie y de la disponibilidad del recurso, los clasifican en sistemas convectivos (o hidrotermales), sistemas conductivos y acuíferos profundos.

Un sistema geotérmico generalmente se clasifica por sus características geológicas, hidrogeológicas y de transferencia de calor, mientras que un recurso geotérmico está formado por una cantidad económicamente suficiente de concentración de calor en la profundidad perforable de la corteza terrestre (Moeck, 2014).

Palacio-Villa (2020) menciona que el aprovechamiento convencional de este recurso depende de las siguientes características naturales: una gran fuente de calor a una profundidad técnica y económicamente viable, un reservorio permeable, suficiente fluido geotérmico (agua al estado líquido o vapor), una capa sello superior (roca impermeable), y un sistema de recarga confiable.

2.1.1.1. Clasificación de sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos se clasifican generalmente con base en el rango de temperatura de los fluidos que constituyen el medio de transporte del calor, pero además se pueden clasificar de acuerdo al análisis de su entalpía, por ejemplo: 1) Recursos de alta entalpía (o alto contenido energético) son aquellos en los que la temperatura del fluido es mayor a 200 °C y es ideal para la producción de electricidad con turbogeneradores; 2) Sistema de mediana entalpía es aquel en el que la temperatura del fluido se encuentra entre los 100 a 200 °C y 3) Sistema de baja entalpía si la temperatura es menor a los 100 °C (Santoyo y Barragán-Reyes, 2010).

Otra clasificación es la siguiente:

a) Sistemas geotérmico hidrotermal

Los sistemas hidrotermales son los más comunes y más viables, representan aquellos que almacenan y transfieren calor de las dos maneras en las que puede llegar el flujo de calor a la superficie; por procesos conductivos y convectivos a través de medios porosos. Y pueden estar dominados por agua o vapor o vapor seco (Ganguly y Mohan-Kumar, 2016; Stober y Bucher, 2013).

b) Sistemas geo-presurizados

Son aquellos que están dominados por vapor, agua y metano a altas temperaturas y presiones. Se caracterizan por ser un tipo de sistema estático en el que el agua queda atrapada dentro de roca permeable contenida por capas impermeables (Ganguly y Mohan-Kumar, 2016).

c) Sistemas de roca seca-caliente.

El sistema de roca seca caliente es un tipo de reservorio artificial en el que se perforan pozos y se inyecta agua en la roca ígnea caliente (por medio de pozos inyectoras), permitiendo el calentamiento del agua mediante un proceso similar al del sistema hidrotermal para después extraerla junto con el vapor por medio de otros pozos (pozos productores). Son sistemas geotérmicos en los que únicamente se aprovecha el calor de la roca por medio de la inyección de agua, ya que en su estructura no presenta fluidos que conduzcan el calor de manera natural a la superficie (Ganguly y Mohan-Kumar, 2016; Stober y Bucher, 2013).

2.1.2. Reservorio geotérmico

Son zonas frecuentemente confinadas por capas de roca impermeables y en el interior se compone de capas permeables que permiten la acumulación de calor (Ganguly et al., 2017).

2.1.3. Provincia geotérmica

Cataldi y Mainieri (1995) definen que una provincia geotérmica es “una porción grande de un territorio, al que debido a sus condiciones lito-estratigráfica, hidrogeológicas, vulcanológicas, tectónicas, régimen térmico, etc., tiene un carácter geotérmico propio a escala regional por lo que puede distinguirse de las porciones contiguas del territorio”.

De acuerdo con Prol-Ledesma y Moran-Zenteno (2019), una provincia geotérmica se define en función de sus condiciones geológicas, térmicas e hidrogeológicas. Esta definición se ha utilizado para proponer una "clasificación geotérmica" de áreas para la producción de energía geotérmica representada en su reciente publicación acerca de un mapa de flujo de calor y provincias geotérmicas en México, en el cual su herramienta más importante para la configuración de este mapa fue la información de temperatura y profundidad de los eventos térmicos más recientes.

2.1.4. Play petrolero

En geotermia se propone un término basado en el concepto de “play petrolero”, de hecho, es la base conceptual, pero aplicado a sistemas geotérmicos. Según la Secretaría de Energía (SENER) un “*play* petrolero” es un conjunto de campos y/o prospectos en determinada región, que están controlados por las mismas características geológicas generales: roca almacén, sello, roca generadora y tipo de trampa (SENER, 2015).

2.1.5. Play geotérmico

Los “*play*” geotérmicos, por otro lado, se pueden definir como conjuntos de condiciones geológicas que pueden soportar sistemas geotérmicos naturales o de ingeniería, donde la fuente de calor, los controles geológicos en términos de vías de migración del calor, la capacidad de almacenamiento de calor/fluidos y el potencial de recuperación económica del calor son los elementos clave. La definición de “*play*” geotérmicos agrupa sistemas geotérmicos similares en categorías considerando básicamente la fuente y el transporte de calor en relación con un mismo hábitat geológico o similar (Moeck, 2014).

El léxico australiano indica que el play geotérmico también se puede utilizar como "un descriptor cualitativo informal" para una acumulación de energía térmica dentro de la corteza terrestre y se puede aplicar al calor contenido en rocas y / o fluidos (Gutiérrez-Negrín, 2015).

El entorno geológico no sólo controla el tipo de “*play*”, también los medios tecnológicos para la recuperación del calor.

2.1.5.1. Clasificación de “play”

En la industria del petróleo Doust (2010) señala que el concepto de “play” permite agrupar zonas potenciales para la exploración del recurso, refiriéndose a las áreas y tendencias a investigar, en lugar de escatimar en prospectos individuales; y describe el “play” como grupos de acumulaciones y prospectos que se asemejan mucho geológicamente, compartiendo condiciones similares de fuente, reservorio, sello y trampa; y que se emplea en las actividades de planificación y gestión de riesgos de las primeras etapas de exploración.

A partir de esta definición y las similitudes entre un sistema petrolero y uno geotérmico, Moeck *et al.*, (2019) define las características de un “play” de naturaleza geotermal, implementando elementos en común, como los mecanismos de transporte de calor, controles geológicos sobre permeabilidad y porosidad; que determinan en ambos escenarios condiciones similares de fuente, reservorio, sello y trampa.

Moeck (2014) en su trabajo “*Catalog of geothermal play types based on geologic controls*” explica la importancia de conceptos geológicos para la caracterización de sistemas geotérmicos, empezando por la clasificación de “play” geotérmico.

La clasificación de “play” se basa en el proceso de transporte del calor, que consta de un fenómeno convectivo o conductivo, y de la fuente de calor que puede ser ígneo (magmático) o no magmático.

Los tipos de “play” ígneos se clasifican como conductivos y convectivos. La principal diferencia es que los sistemas dominados por conducción están asociados al calor radiogénico (típicamente de granitos) y se produce un ligero tectonismo, pero no hay vulcanismo activo. Mientras que, los “play” magmáticos dominados por convección requieren una cámara magmática como fuente de calor en áreas volcánicas y tectónicamente activas. Y, por otro lado, los juegos ígneos dominados por la conducción carecen de fluidos naturales y se denominan sistemas "secos"; estos requieren tecnología *Engineered Geothermal System* (EGS) para fracturamiento hidráulico y circulación inducida por inyección de fluidos para transferir calor desde la profundidad a la superficie.

a) Convectivo

Son sistemas geotérmicos reconocidos como viables o activos debido a su dinámica de fluidos y a su capacidad de contener recursos de alta entalpía, estos se encuentran en márgenes de placas, o en entornos de tectonismo activo o vulcanismo. Una fuente de calor induce la conducción del flujo de calor elevado y lo transporta desde los niveles más profundos hasta la superficie. Generalmente dominan en esta clasificación los recursos de alta temperatura y presentan velocidades de fluidos más rápidos que en los recursos de baja temperatura, además, los controles estructurales tienen un efecto importante en las vías de flujo de fluidos en los sistemas dominados por convección.

En general, un alto gradiente geotérmico, un flujo natural de fluidos y una dinámica de fluidos caracterizan los juegos geotérmicos dominados por la convección.

Los escenarios tectónicos favorables para esta clasificación de “*play*” son:

- i. Arcos magmáticos sobre márgenes de placas convergentes
- ii. Márgenes divergentes ubicados dentro de entornos oceánicos o intra-continentales
- iii. Márgenes transformantes (con fallas de rumbo regionales)
- iv. Magmatismo intra-placa (puntos calientes)

b) Conductivo

En los “*play*” geotérmicos dominados por conducción predominan los recursos de baja a media entalpía, se conocen como pasivos debido a la ausencia de un flujo convectivo y una dinámica de fluidos. Estos sistemas están ubicados predominantemente en entornos de placas tectónicas pasivas donde no se produce un tectonismo o vulcanismo reciente significativo. Aquí, el gradiente geotérmico es promedio, por lo que este tipo de “*play*” geotérmico se encuentra a mayor profundidad que los sistemas geotérmicos dominados por convección. Los juegos geotérmicos dominados por la conducción requieren EGS tecnología para ser aprovechable.

En los sistemas de “*play*” dominados por conducción es más esencial esta tecnología que en los sistemas convectivos. Y es importante clasificar y comprender los entornos EGS potenciales en los sistemas de “*play*” dominados por la conducción. Esta clasificación contiene tres escenarios diferentes:

- i. Cuenca intra-cratónica
- ii. Cinturón orogénico
- iii. Basamento/roca cristalina

Estos tipos consideran también la porosidad-permeabilidad de la roca y la ausencia o presencia de fluidos producibles en el yacimiento

2.1.6. Recursos geotérmicos

"Los recursos geotérmicos son definidos como aquella parte de la energía geotérmica que puede extraerse económica y legalmente en un futuro próximo" (Hurter y Haenel, 2002). También son definidos como yacimientos geotérmicos, los cuales involucran fluidos en fase líquida, o sea, agua. El agua es el principal combustible para que la geotermia llegue a la superficie y pueda ser aprovechada (Ingebritsen y Gleeson, 2017).

Son considerados recursos geotérmicos cuando esta energía se encuentra concentrada de forma que puede ser extraída y aprovechada por el hombre, y si estos recursos geotérmicos pueden aprovecharse de una forma económicamente competitiva, se dice que constituyen un yacimiento geotérmico (Grupo Visiona, sf).

2.1.7. Yacimiento geotérmico

Espacio físico en el interior de la corteza terrestre con unas determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable (IDEA, 2011).

2.1.7.1. Clasificación de yacimientos geotérmicos

- c) Yacimientos de alta entalpía. Son aquellos en los que las condiciones convencionales de un yacimiento y el foco de calor permite que el fluido se encuentre en condiciones de presión y alta temperatura: superior a los 150°C. Las características térmicas del fluido permiten su aprovechamiento fundamentalmente para la producción de electricidad (IDAE, 2008).
- d) Yacimientos de media entalpía. Los fluidos se encuentran a temperaturas que van de los 100°C y los 150°C, lo que permite su uso para producción de electricidad por medio de sistemas de producción de ciclos binarios que tienen menor rendimiento (IDAE, 2008).
- e) Yacimientos de baja entalpía, cuando la temperatura del fluido es inferior a los 100°C y su aplicación se centra en los usos térmicos en sistemas de calefacción/climatización, balneoterapia, y en diferentes procesos industriales (IDAE, 2008).

2.2. GEOFÍSICA

Es una de las ciencias de la Tierra y sub-disciplina de la Física que aplica los principios y métodos de la Física al estudio de la Tierra. Estudia una variedad de fenómenos geológicos, incluida la distribución de la temperatura del interior de la Tierra; la fuente, configuración y variaciones del campo geomagnético; y las características a gran escala de la corteza terrestre, como la dinámica de las placas tectónicas en las dorsales oceánicas (Britannica, 2013).

2.2.1. Métodos geofísicos potenciales

Los campos magnético y gravimétrico terrestres son campos físicos naturales asumidos con frecuencia como campos potenciales, a los métodos científicos usados para su estudio e interpretación geofísica del subsuelo se les conoce como métodos geofísicos potenciales (Galván-Pineda, 2016).

2.2.1.1. Magnetometría

El método de prospección magnética o magnetometría se basa en el estudio de las anomalías del campo magnético Terrestre, causadas por la variación de las propiedades magnéticas de las rocas subyacentes, también denominada como susceptibilidad magnética (Mochales-López, 2006).

2.2.1.2. Levantamiento aero-magnético

Según Obiora *et al* (2015), el levantamiento aero-magnético es el método de exploración de la intensidad del campo magnético de la tierra con magnetómetros instalados en aviones o helicópteros. Estos magnetómetros registran pequeñas diferencias en la intensidad del campo magnético.

2.2.1.3. Anomalía magnética

Las anomalías magnéticas son causadas por las concentraciones de minerales magnéticos (como la magnetita) en las rocas de la corteza terrestre. Dada su pequeña magnitud, puede ser considerada como una perturbación respecto a lo marcado por el campo principal y se le denomina anomalía magnética (Catalán y Martos, 2016).

Las rocas magnetizadas producen variaciones en el campo magnético que pueden alcanzar valores de hasta los 1,000 nT. Estas variaciones representan las anomalías magnéticas y es a través de las mismas que se puede llegar a una aproximación de los materiales presentes en el subsuelo y su configuración (Peredo-Mancilla, 2015).

Para crear un mapa de anomalías magnéticas es necesario realizar correcciones a los datos medidos. En este caso los datos se corrigen tomando en cuenta los efectos de variación diurna, así como el efecto de la latitud (IGRF). La anomalía magnética (ΔF) de cada punto se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta F = F_{obs} - IGRF - \delta F$$

Fórmula 1. Ecuación para obtener la anomalía magnética considerando la variación diurna.

Donde,

F_{obs}: valor del campo magnético observado.

IGRF: valor del Campo Geomagnético de Referencia Internacional.

δF: es la corrección por variación diurna.

2.2.1.4. Filtros y/o algoritmos de realce

a) Reducción al polo

Esta corrección consiste en reducir el campo generado por medio de un campo hipotético transformando la anomalía medida bajo cualquier dirección del campo magnético en su correspondiente medida en campo vertical. Como resultado las anomalías se reubican sobre sus respectivos cuerpos causales produciendo anomalías simétricas (Pérez-Corona, 2011).

El filtro de realce de reducción al polo permite llevar el cuerpo que genera la anomalía al polo magnético (donde la inclinación es de 90° y la declinación de 0°), ubicando la anomalía magnética congruentemente sobre el cuerpo que las genera, y así favorecer la interpretación en cualquier modelo que se proponga. Se realiza con base en la siguiente fórmula:

$$L(\theta) = \frac{[\sin I - I * \cos(I) * \cos(D - \theta)]^2}{[\sin 2Ia + \cos 2(D - \theta) * \sin 2Ia + \cos 2I * \cos 2(D - \theta)]}$$

Fórmula 2. Fundamento matemático del filtro de reducción al polo.

Donde,

I: inclinación

D: declinación

Ia: inclinación para corrección de amplitud

El fundamento matemático representa la conversión angular real del punto o fuente que causa la anomalía magnética, reduciendo el área o amplitud de esta a una superficie cercana a su origen.

b) Primera derivada

La primera derivada enfatiza anomalías menos profundas y que se pueden calcular en los dominios de espacio-frecuencia. Este filtro se emplea para agudizar los bordes de los cuerpos anómalos y suprimir las anomalías regionales para mejorar las anomalías locales. Esta técnica también se conoce como FVD (*First Vertical Derivative*) y retrata la tasa de cambio de la anomalía con la elevación o la variación de la anomalía con la altura (Obiora *et al.*, 2018).

$$L(r) = rn$$

Fórmula 3. Ecuación general de la primera derivada vertical.

Donde,

n: orden de diferenciación

r: número de onda (radianes/unidad de longitud)

La primera derivada realza altas frecuencias relativas a bajas frecuencias. Esta propiedad es la base para la aplicación del proceso de derivada, el cual elimina los efectos regionales de gran longitud de onda y resuelve los efectos de anomalías someras (Fantón *et al.*, 2015).

c) Señal Analítica

La señal analítica es un procesamiento que permite destacar rasgos de anomalías magnéticas o gravimétricas utilizadas para definir los valores máximos sobre los cuerpos anómalos identificados en la sub-superficie, permitiendo así resaltar los bordes de las estructuras geológicas que causan las anomalías magnéticas. La señal analítica también es útil para centrar las anomalías sobre su fuente en zonas de baja latitud magnética. También se le conoce como método de gradiente total debido a que el valor absoluto de la señal analítica equivale al valor absoluto del gradiente total. Así mismo el valor de la señal analítica es calculado a través de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las derivadas en las tres direcciones (x, y, z).

$$|A(x, y)| = \sqrt{\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2}$$

Fórmula 4. Ecuación general del método Señal Analítica.

Donde,

$A(x, y)$: es la señal analítica del campo potencial.

$\phi_x^2, \phi_y^2, \phi_z^2$: campo magnético (en las tres direcciones vectoriales: x, y, z).

2.3. MÉTODO DE SUMA PONDERADA

Este método es utilizado en análisis multi-criterio o multi-variable, en donde tiene la función de conjuntar distintas variables bajo la superposición de pesos ponderados o ponderaciones basados en la importancia relativa del tema analizado incorporando criterios de escala (Marcano *et al.*, 2012).

2.3.1. Media aritmética ponderada

Uno de los conceptos de promedio más conocido y usado para la realización de diferentes cálculos, es indudablemente la media aritmética, la cual tiene diferentes acepciones que han permitido dar solución a problemas estadísticos-matemáticos.

Precisamente en la búsqueda de soluciones, la media aritmética toma otra dimensión cuando aparece la llamada media aritmética ponderada, en donde a cada valor, se le asocia su correspondiente ponderación. Y cada valor se multiplica por su respectiva ponderación (Rondero-Guerrero, 2010).

Expresada de la siguiente manera:

$$x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_np_n = \sum_{k=1}^n x_n P_n$$

Fórmula 5. Forma básica de la media aritmética ponderada (Rondero-Guerrero,2010).

Donde,

x : variable

p : valor de la ponderación

n : número de variables

k : ubicación de los pesos o ponderaciones

2.3.2. Álgebra de mapas

Castellanos-Fajardo (2017) define el álgebra de mapas como una técnica de análisis espacial por medio de SIG que estudia cualitativa o cuantitativamente aquellos fenómenos que se manifiestan en el espacio por medio de la combinación de múltiples capas procesadas matemáticamente.

CAPÍTULO III MARCO GEOLÓGICO

El análisis geológico permite evaluar superficialmente los sitios que albergan sistemas geotérmicos, y al mismo tiempo inferir los medios de transporte de la energía calorífica por medio del reconocimiento estructural (Daniilidis *et al.*, 2020). Por lo tanto, para comprender la relación y/o interdependencias entre los parámetros físicos y los operacionales en un yacimiento geotérmico, a continuación, se define el contexto geológico de la zona de estudio.

3.1. GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se encuentra en la porción central del estado de Hidalgo, zona donde se encuentra la provincia geológica y geotérmica más importante para el estudio de sistemas geotérmicos: la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM).

3.1.1. Faja Volcánica Transmexicana (FVTM)

Se acostumbra definir la FVTM como un arco magmático continental, formado por más de 8 000 estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos, que se extiende desde el Pacífico, hasta las costas del Golfo de México. La provincia mide alrededor de 1000 km de longitud con una amplitud irregular de 80 a 230 km y se distribuye

con una dirección preferencial E-W en su parte central y oriental, WNW-ESE en su parte occidental, causando oblicuidad con respecto a la Trinchera Mesoamericana. Su distribución transversal permitió su caracterización y particularidad con respecto a cualquier otro arco magmático procedente de la convergencia de placas tectónicas en el mundo, además, su complejidad ha causado su ordenamiento en tres porciones con base en su geología y tectónica: una porción occidental, central y oriental (Gómez-Tuena, 2005).

3.1.2. Complejo volcánico de Tulancingo-Acocolco

El complejo volcánico de Tulancingo-Acocolco se localiza al oriente de la FVTM y es una región que se caracteriza por la evolución de dos eventos precursores a la formación de un cuerpo calderico: fallamiento y ascenso de magma a través de zonas de ruptura (Andrade-Enríquez, 2020).

Está constituido principalmente por la acumulación de derrames de lava, domos y productos piroclásticos, que incluyen ignimbritas, y depósitos de caída de naturaleza basáltica, andesítica, dacíticas y riolíticas, emplazadas en la intersección de dos sistemas de fallas regionales de dirección NE-SW y NW-SE (Avendaño-Cortes, 2017).

López - Hernández (2009) asegura que está formado por la acumulación de productos volcánicos resultantes de la evolución de dos calderas sobrepuestas: la caldera de Tulancingo de 32 km de diámetro formada durante el Plioceno; y la más reciente, denominada Acocolco, con un diámetro de 18 km aproximadamente del Pleistoceno, encontrándose esta última anidada en la primera.

La columna litológica se integra por tres unidades importantes; desde la base un cuerpo intrusivo granítico, seguido de una secuencia sedimentaria metamorfizada y coronando el material volcánico de ambas calderas de composición félsica.

El vulcanismo más antiguo de la zona es anterior al complejo y está alineado NW-SE. A este evento pertenecen centros volcánicos importantes como el de Pachuca, Apan y Cerro Grande, presentando edades desde los 13.4 a 9 Ma. Y los eventos posteriores evidencian un vulcanismo de tipo monogenético de composición principalmente Andesita-basáltica (López-Hernández, 2009).

3.1.3. Caldera de Chichicautla

Solana-López (2010) describe la caldera como una estructura semi-circular de 6 km de diámetro y 250 m de altura sobre el terreno fallada en su flanco sudoccidental por un evento de colapso con cinemática normal con dirección NE, formada por una serie de brechas y lapilli en matriz de piroclastos intercalados con la Andesita Chichicautla. Además, identifica un cono volcánico conocido como Tío Lolo de 50 m de altura cubierto parcialmente por material lacustre del Plioceno tardío.

La FVTM es el conjunto estructural de mayor relación con la fisiografía, geología y geomorfología de la zona delimitada como “*play*” geotérmico.

Cubre una superficie aproximada de 7200 km², en la cual se tienen diferentes estudios realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM), en los cuales se han registrado una gran variedad de litologías y estructuras predominantemente de origen ígneo asociadas a la geo-dinámica de la Faja Volcánica Transmexicana. Por esta razón la zona se dividió en sectores que facilitarían su descripción y análisis (

Figura 1).

3.2. SECTORES DEL “PLAY” GEOTÉRMICO

El área de estudio se dividió en sectores que facilitaron el análisis y descripción geológica, lo que permitió delimitar tres zonas para una descripción general de la geología y estructuras de interés como fallas, lineamientos, elevaciones topográficas destacables, domos, calderas, entre otros, obteniendo tres sectores: occidental, central y oriental.

3.2.1. Sector occidental del “play” geotérmico

Este sector del “play geotérmico” está caracterizada por el vulcanismo de las calderas de Amealco y Huichapan, siendo estas las estructuras de vulcanismo explosivo que representan la formación y evolución del ambiente geológico.

La caldera de Huichapan tiene un diámetro de 8.5 km y se originó hace 4.2 Ma a partir de la erupción de varios flujos de ignimbritas. Las etapas de formación consistieron en una primera fase pre-caldérica de basaltos y riolitas del grupo San Juan, seguido de una etapa caldérica de ignimbritas y finalmente la última etapa se consolida con andesitas, dacitas y basaltos (Milán *et al.*, 1993).

La estructura caldérica de Amealco se reconoce como una de las principales calderas de la Faja Volcánica Transmexicana formada hace aproximadamente 4.7 Ma definida por una secuencia piroclástica formada por: Toba Amealco, el producto piroclástico de mayor alcance y de mayor volumen, extravasada hace aproximadamente 4.7 Ma; Pómez Ladrillo, un evento piroclástico posterior y de menor impacto; la Andesita Amealco y la Dacita Campana, identificadas estas dos secuencias como domos de lava emplazados hace 4.3 Ma, el primero formado por lavas traquiandesíticas y el segundo por lavas traquidacíticas, las cuales surgen de una fractura anular que caracteriza a la caldera; Riolita La Cruz, que consiste en una serie de domos formados hace 3.9 Ma circunferidos por la caldera; y corona la Andesita Santa Rosa que consiste en domos traquiandesíticos emplazados hace 3.9 Ma. El vulcanismo que precede al que originó a dicha caldera se caracteriza por basaltos del Mioceno e Ignimbritas de la misma edad de la Toba Amealco (Aguirre, 1996).

Además, la mayor cantidad de sitios con manifestaciones superficiales de calor como las aguas termales y fumarolas de vapor que se localizan en esta zona, son áreas que se han aprovechado de manera cultural y económica, principalmente en el municipio de Ixmiquilpan y Huichapan.

Al norte de este sector afloran parcialmente calizas arrecifales de la Formación El Doctor, lutitas y calizas arcillosas pertenecientes a la Formación Soyatal, la cual se identifica en una pequeña porción de la zona cortada por la falla El Defay que mantiene una dirección NE-SW. Cubriendo indistintamente a la unidad anterior se encuentra una secuencia volcánica de edad Oligoceno-Mioceno que varían de composición riolítica (definidas en el cerro Juárez) a basáltica (expuestas en el cerro Daxhie), conocidas como la Formación Las Espinas (SGM, 2001).

El vulcanismo de las calderas de Amealco y Huichapan dominan esta porción de la zona de estudio, teniendo una litología descrita en su origen como vulcanismo post-caldera, de acuerdo con las rocas de composición máfica e intermedia que afloran en el lugar. Los aparatos volcánicos más sobresalientes son los cerros La Cruz, El Cazadero, Colorado, Los Caballos y Cerro Frío (

Figura 1) compuestos principalmente por secuencias andesíticas irregulares, emplazadas sobre derrames de Basalto-Andesita del Plioceno tardío (SGM, 2012).

La estructura anular cercana a los aparatos volcánicos Peña Colorada, Siete Minas y Elefante (

Figura 1) se asocia a un lineamiento circular característico de las calderas o cuerpos intrusivos que tienen una geometría semi-circular. De igual modo, se identifican los domos resurgentes de la caldera de Huichapan (Hualtepec y Gexca) como productos de los últimos eventos explosivos de esta, los cuales extravasaron lavas de composición dacítica a riolítica de una edad aproximada de 4.2 Ma (SGM, 2009). También se reconocen los cerros Xothé y Nopala como aparatos volcánicos de composición basáltica extravasada (

Figura 1).

3.2.2. Sector central del “play” geotérmico

Abarca algunos municipios que han sido caracterizados por su incomparable paisaje geológico, secuencias sedimentarias reconocidas en la porción occidental, así como algunos afloramientos del conglomerado polimíctico perteneciente a la Formación El Morro.

Las secuencias ígneas están representadas por la extrusión de coladas de composición andesítica-basáltica del Mioceno y Plioceno, a las cuales le sobre-yacen una sucesión vulcanoclástica de toba riolítica y dacítica conocida como Toba Donguinyó asociada a la actividad volcánica de la caldera de Huichapan (SGM, 2009). Estas secuencias litológicas se reconocen en las elevaciones topográficas de mayor prominencia, como el cerro Xicuco reconocido como un antiguo aparato volcánico, el cerro El Picacho y el cerro Rincón de los Caballos (

Figura 1).

La estructura anular cercana a los aparatos volcánicos Peña Colorada, Siete Minas y Elefante (Figura 3) se reconoce como un lineamiento circular característico de las calderas o cuerpos intrusivos que al momento de ascender a la superficie generan un patrón de adelgazamiento de corteza manteniendo una geometría semi-circular, la cual, predice la formación de un domo o algún producto volcánico similar (Martínez *et al.*,1986).

En las cercanías de la capital del estado y del municipio de Actopan aflora una brecha volcánica dacítica del mioceno correspondiente a la Formación Zumate, la cual es reconocible en altos geomorfológicos como el cerro Las Monjas y cerro Plomosas (SGM, 1995)., reconociéndose al este de estos afloramientos vestigios de algunos aparatos volcánicos.

El relieve volcánico, conserva rasgos característicos de su génesis geológica, (en los cerros: Las Brujas, La Sotolera, El Picacho y El Chirerete) asociada al vulcanismo pleistocénico de la sierra de Las Navajas, que conserva un relicto relieve semi-circular. La sierra de Las Navajas es un complejo volcánico principalmente riolítico que emplazo gran material vítreo y tobáceo en los alrededores (SGM, 2007).

Finalizando el registro litológico, se tienen depósitos piro-clásticos dominados por derrames de lava y secuencias pumicíticas porosas depositadas durante el Pleistoceno cubriendo las edificaciones volcánicas conocidas como Cerro Redondo, Espíndola y Cubitos (

Figura 1), conformados por andesitas y brechas extravasadas durante el Oligoceno, mientras que otras se conforman en su totalidad de este material, como, por ejemplo, el cráter Tezontle y el cerro Los Montieles (SGM, 2007).

Al oriente de estos afloramientos se concentran vestigios de aparatos volcánicos conservando rasgos característicos de su génesis geológica, tal como, los cerros Las Brujas, La Sotolera, El Picacho y el Chirerete, que corresponden al vulcanismo pleistocénico de la sierra de Las Navajas, exhibiendo una topografía erosionada, pero que conservan un relicto de relieve semicircular.

El volcán riolítico de las Navajas es uno de los aparatos más destacados de la región, está compuesto por flujos de lava y domos de composición riolítica peralcalina intercalados con depósitos piroclásticos de caída y de flujo que permitieron la formación del aparato volcánico. El sector norte del complejo volcánico colapsó y los productos extravasados de esta erupción se reconocen en la cañada de Río Grande de Tulancingo (Nelson y Lighthart, 1997). Las lavas cubren los basaltos columnares de San Miguel Regla fechados a 1.80 Ma (Nelson y Lighthart, 1997) y sobreyace discordantemente a las lavas andesíticas y dacíticas de la Andesita Chichicuautila (Solana, 2010) por lo que el complejo se considera de edad aún más

reciente. Esta edad permite asociar los eventos volcánicos a la actividad de la caldera de Acoculco al oriente de la zona.

3.2.3. Sector oriental del “play” geotérmico

La mayoría de los aparatos volcánicos se concentran en este sector, formados durante el Plioceno y hasta el Pleistoceno, caracterizando el vulcanismo del sector oriental de la FVTM. Las rocas volcánicas más antiguas afloran en los cerros La Cantera y Ventoso, se trata de flujos de Riolita, Ignimbrita, secuencias de Dacita, y brecha volcánica del Mioceno (SGM, 2016).

El vulcanismo del Plioceno se reconoce en los vestigios volcánicos de los cerros: Verde, Napateco, Jagüey Chico, el Mirador, y La Campana; siendo este último el único de composición basáltica con intercalaciones de Andesita, mientras que el resto están constituidos por derrames dacíticos-riolíticos que evidencian el inicio de un episodio volcánico mucho más ácido y violento, ya que el alcance del material piroclástico cubre gran parte de este sector (SGM, 2016).

Los cerros Molcajete, Paila (I y II), Tepetongo, Verde, Tepezala, Chato y Campanario son algunos de los domos monogenéticos formados por material piroclástico y lavas basálticas emplazadas en el mismo periodo que se originó el complejo volcánico Las Navajas, en el Pleistoceno (SGM, 2016). Los volcanes monogenéticos resultan ser de gran relevancia para comprender la relación entre la sismicidad, deformación y eventos de desgasificación en sistemas geotérmicos: eventos que favorecen vías térmicas pasivas (Albert *et al.*, 2016).

Los conos cineríticos más destacados son los que comprende el campo volcánico de la caldera de Chichicuautila, estos son Tecajete, Metepec, El Montito, Coatzetzingo, y las estructuras relictas de la misma caldera. Se caracterizan por secuencias piroclásticas depositadas durante el Pleistoceno, siendo estas las evidencias de los últimos episodios volcánicos dentro de la zona (SGM, 2019).

Cada uno de los edificios volcánicos descritos se muestran en el siguiente mapa, el cual otorga un esquema de menor escala al pie del gráfico principal para localizar las secciones del “play” definidas anteriormente.

Como se puede observar en la

Figura 1, la litología no es el único parámetro que compone a la geología; las fallas, lineamientos, entre otras componentes estructurales son importantes para comprender la estructura de un yacimiento geotérmico. De acuerdo con Jolie *et al.*, (2016) la geología estructural permite localizar áreas de manifestación térmica porque permiten el flujo de estas a través de las zonas de fractura que permiten que la roca sea permeable y de esta manera viajen los fluidos del interior a la superficie; son sitios con mayor emanación y desgasificación de fluidos que ascienden a partir de diferentes fuentes de calor, como los intrusivos,

basamentos cristalinos, entre otros, siendo los principales factores que facilitan la circulación de fluidos que hacen del yacimiento geotérmico un recurso viable y aprovechable.

Además, con la geología estructural es posible conocer cómo se comportará el fluido y en qué zonas descargará la energía térmica (Niederau *et al.*, 2019).

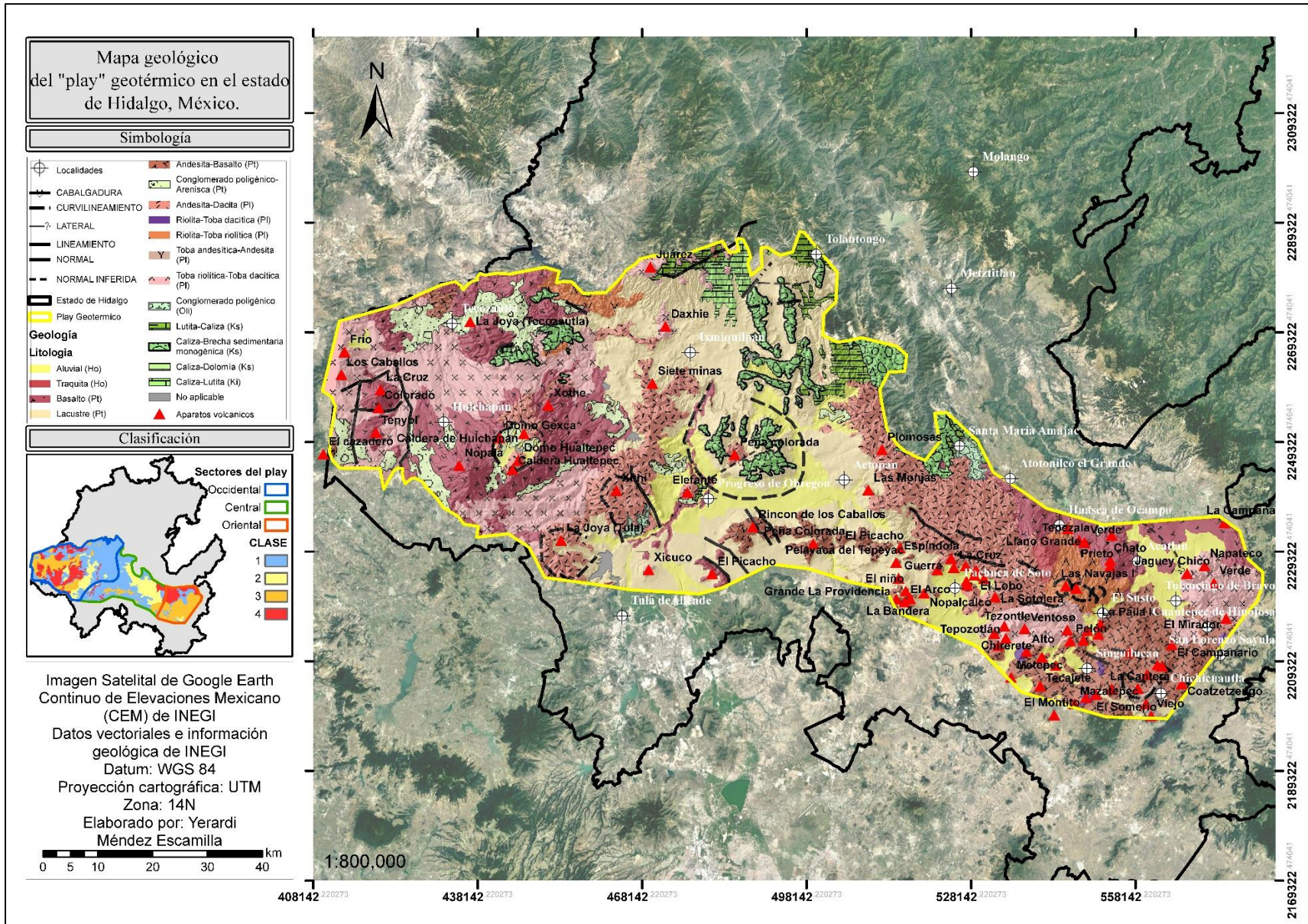


Figura 1. Litología, geología estructural y aparatos volcánicos del "play" geotérmico.

3.3. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología de la zona de estudio está dominada por estructuras de origen ígneo, sierras volcánicas, domos, cráteres, volcanes extintos y calderas. Estas estructuras son relevantes para la localización de sistemas geotérmicos, ya que otorgan información sobre las fuentes de calor y su alcance.

La superficie del “*play*” geotérmico muestra una hipsometría relativamente alta conforme a la ubicación geográfica de la zona de estudio, presenta una altura máxima de 3184 msnm y una altura mínima de 1191 msnm. Las geoformas de interés se analizaron de acuerdo al tipo de relieve que presentan, por lo tanto, se reconocieron 6 tipos de relieve: Montaña, Ladera, Pie de monte, Llanura, Cráter y Ruina volcánica. En el siguiente mapa se pueden observar los parámetros geomorfológicos mencionados.

Esta información se fundamenta con la ficha de datos geomorfológicos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, sf).

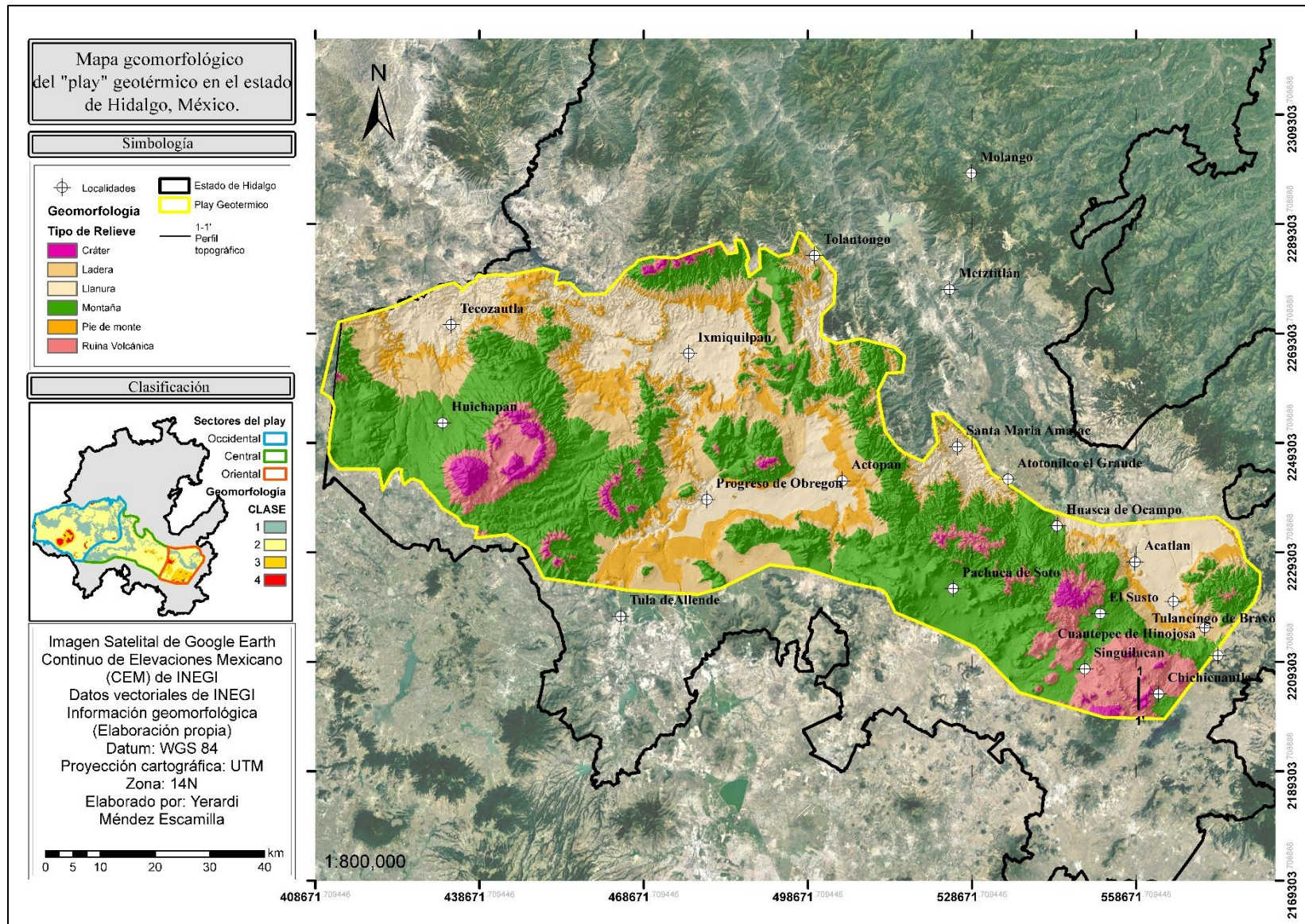


Figura 2. Geomorfología descrita por medio del tipo de relieve encontrado en el área delimitada como “play” geotérmico.

Se puede observar que las geoformas son consideradas como medio descriptivo y que existen más tipos de relieve en la zona de estudio. Sin embargo, sólo se consideraron aquellos tipos de relieve que pueden asociarse al ambiente de formación de un sistema geotérmico.

3.4. FISIOGRAFÍA

Fisiográficamente la FVTM cubre cerca de su totalidad al área de estudio delimitada como “*play*” geotérmico; y el resto se encuentra cubierta por la Sierra Madre Oriental. A su vez, el área se localiza en la sub-provincia Llanuras y Sierra de Querétaro e Hidalgo, Carso Huasteco, y Lagos y volcanes de Anáhuac (INEGI, 2015), tal como se aprecia en la Figura 3.

La FVTM resulta ser la provincia de mayor relevancia en el área de estudio, esta provincia es descrita por Gómez-Tuena *et al.* (2007) como un arco magmático irregular que cruza de oriente a poniente el territorio mexicano, conformado por una gran cantidad de estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos del Cenozoico.

Mientras que la sub-provincia de mayor área se caracteriza por presentar un sistema montañoso de mediana altitud formado por la erosión de antiguas estructuras volcánicas como calderas, domos, conos cineríticos y volcanes, además de las extensas llanuras cubiertas por sedimento aluvial y secuencias piroclásticas de edad terciaria (Ramón-Melo, 2017).

La FVTM resulta ser la provincia de mayor relevancia en el área de estudio, siendo el sector oriental el que define las características geológicas de la zona. Es descrita por Gómez-Tuena *et al.* (2007) como un arco magmático irregular que cruza de oriente a poniente el territorio mexicano, conformado por una gran cantidad de estructuras volcánicas y cuerpos intrusivos del Cenozoico. Dichos autores declaran que la mayor parte del vulcanismo del sector oriental de la FVTM se desarrolla durante el Cuaternario. Los episodios máficos se concentran en los conos monogenéticos de los campos volcánicos de la Sierra de Chichinautzin y Apan; y los eventos más importantes de este vulcanismo se encuentran en las estructuras caldéricas como Acoculco, Los Humeros y los domos de Las Derrumbadas, todos ubicados en el estado de Puebla.

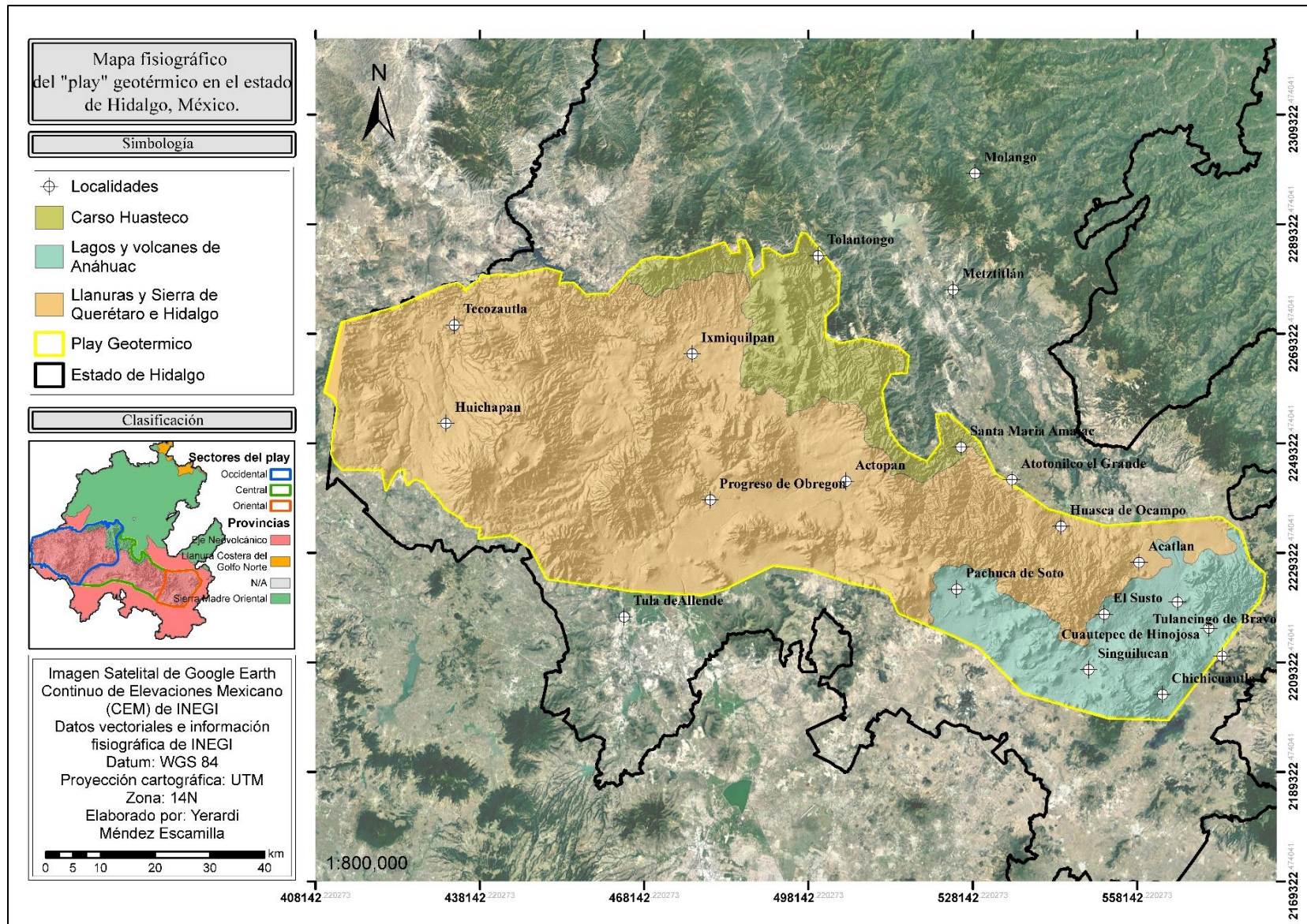


Figura 3. Mapa de provincias y sub-provincias fisiográficas del área de estudio.

Se ha interpretado que las rocas volcánicas más antiguas del sector oriental corresponden a eventos miocénicos de composición alcalina con variaciones en las firmas geoquímicas, presentando características de subducción al norte del estado de Hidalgo y al sur de intraplaca. Están relacionadas a los campos monogenéticos y eventos fisurales que se han emplazado a lo largo de fallas y fracturas que siguen una orientación preferencial E-W (Márquez *et al.*, 1999; García-Palomo *et al.*, 2000), y que por consecuencia dicho sistema de fallas favorece el ascenso de magmas primitivos en este sector.

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

4.1. DEFINICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se definió por medio de la localización de los principales sitios de interés térmico y las manifestaciones termales más conocidas del estado de Hidalgo, identificando así una tendencia lineal de la actividad geotérmica en dirección NW-SE (figura 4). Para establecer la amplitud de la zona de estudio, se digitalizaron los valores de flujo de calor obtenidos del mapa de provincias geotérmicas (Prol-Ledesma *et al.*, 2018). En el mapa de la figura 6 se definieron los valores de flujo de calor del Estado de Hidalgo y el alcance de las zonas con posible potencial geotérmico.

4.1.1. Localización

La zona de estudio se encuentra en la porción central del estado de Hidalgo, cubre aproximadamente 7200 km² y presenta una geometría variable. Tiene una longitud cercana a los 170 km, una amplitud irregular entre los 30 y 70 km, y se distribuye con una dirección preferencial noroeste-sureste (NW-SE) desde los municipios de Tecozautla y Zimapán hasta el municipio de Cuautepec de Hinojosa (figura 4).

Se localiza dentro del polígono con las coordenadas UTM 413 000 mE, 2 270 000 mN (extremo noroeste), y 571 000 mE, 2211000 mN (extremo sureste).

Debido a su gran extensión territorial se dividió en sectores que permiten una mejor descripción de la zona, estos sectores son: occidental, central y oriental (figura 4).

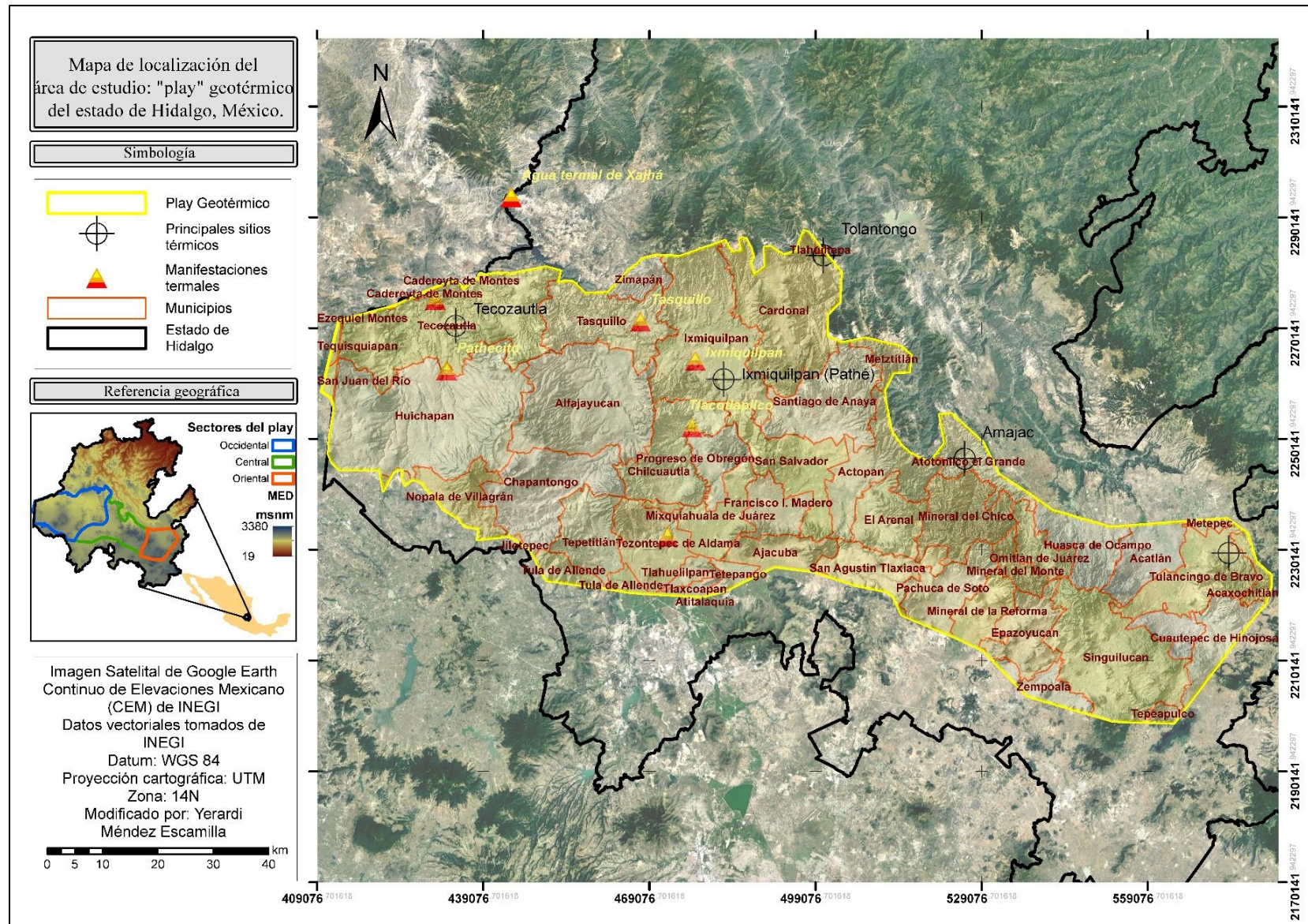


Figura 4. Mapa de localización del área de estudio, muestra la delimitación del “play” geotérmico, así como los municipios que abarca.

4.2. DEFINICIÓN DE VARIABLES

Se consideraron cinco variables relevantes para la configuración de sistemas geotérmicos. Estos son: la geomorfología, la geología, la crono-estratigrafía, el flujo de calor y la geofísica (anomalías magnéticas). La información de cada una de estas variables se correlacionó de modo que la distribución espacial de sus características señalará las zonas más favorables para la acumulación de energía geotérmica.

4.2.1. Geomorfología

Esta variable permitió asociar el tipo de relieve y la altimetría para determinar las estructuras geomorfológicas de mayor importancia que favorecen la configuración de sistemas geotérmicos. Para el reconocimiento geomorfológico se definieron los tipos de relieve con base en la ficha de datos geomorfológicos del Servicio Geológico Mexicano (SGM, sf), se reclasificaron los valores altimétricos del Modelo de Elevación Digital (MED) y se analizaron perfiles de elevación de las principales estructuras de la zona de estudio (calderas y domos volcánicos). Los datos de reclasificación geomorfológica se muestran en la tabla 1.

4.2.1.1. Análisis geomorfológico

Para el reconocimiento geomorfológico se realizó un mapa con reclasificación de valores divididos en categorías de acuerdo al tipo de relieve, teniendo 6 estructuras importantes basadas en su altura y tipo de relieve tal como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Categorías geomorfológicas para la zona propuesta como “play “geotérmico.

Tipo de relieve	Altura (msnm)			N° de estructura
	NW	CENTRO	SE	
Llanura	1191 - 1830	1500 - 2000	2051 - 2170	1
Pie de monte	1831 - 1900	2001 - 2050	2171 - 2200	2
Ladera	1901 - 2020	2051 - 2120	2201 - 2300	3
Montaña	2021 - 2430	2121 - 2850	2301 - 2600	4
Ruina Volcánica	2431 - 2600	2851 - 3000	2601 - 2860	5
Cráter	2601 - 3032	3001 - 3121	2861 - 3184	6

La altimetría de cada clase se determinó con los valores de altura propuestos por Spiridinov (1981) en su tabla de “complejos morfológicos del relieve”, en la cual muestra los intervalos altimétricos por categoría.

De acuerdo con la clasificación, los valores más altos corresponden a las montañas, en este caso se tomó el valor de la Montaña desde los 2021 msnm hasta los 2600 msnm en la parte sur oriental, y así para cada tipo de relieve.

Para la reclasificación, la altura se asigna conforme al criterio de quién analiza la geomorfología, ya que la zona se localiza geográficamente en un terreno de gran elevación, por lo que las categorías de Spiridinov (1981) son únicamente una guía para poder asignar los valores altimétricos según el tipo de relieve.

Además, las geoformas de carácter volcánico presentan una variación hipsométrica importante puesto que depende de factores como la erosión; es por eso que la altura se asigna tomando en cuenta también los perfiles de elevación (figura 5).

En la siguiente imagen se muestra el perfil de elevación de la Caldera de Chichicautla (ver sección en el mapa geomorfológico de la Figura 2); la cual geológicamente se considera una ruina volcánica y de acuerdo con su forma circular también se puede clasificar geomorfológicamente como un cráter, por esta razón se tomó la elevación individual de los relieves de origen volcánico como el que a continuación se ilustra para hacer la reclasificación.

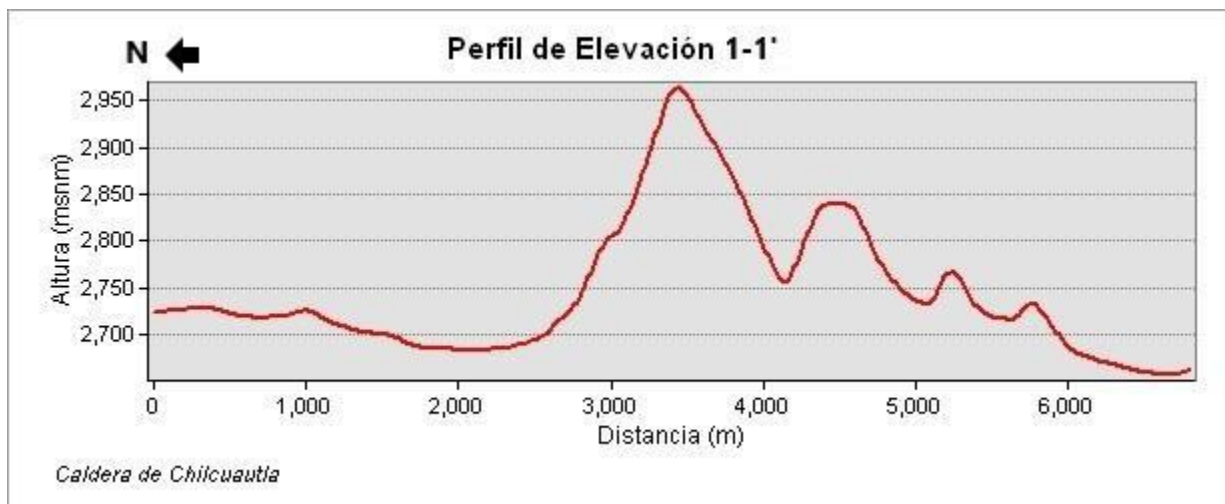


Figura 5. Perfil de elevación de la Caldera de Chichicautla con orientación N-S.

La figura 5 representa el perfil topográfico de la Caldera de Chichicautla. Se consideraron estructuras como esta para hacer la reclasificación de los elementos geomorfológicos porque al obtener los datos altimétricos de estructuras puntuales como esta, es más sencillo agrupar un tipo de relieve con base a su altimetría.

4.2.2. Geología

El análisis del entorno geológico permite evaluar superficialmente cualquier sistema geotérmico, y al mismo tiempo inferir los medios de transporte de la energía calorífica por medio del reconocimiento estructural (Daniilidis *et al.*, 2020).

Por lo tanto, para comprender la relación o las interdependencias entre los parámetros físicos y los operacionales en un yacimiento geotérmico, se debe comenzar con el estudio geológico, principalmente con el reconocimiento de litología ígnea, aparatos volcánicos, fallas y lineamientos estructurales.

El ambiente geológico de la zona de estudio está dominado por la geodinámica de la FVTM, estableciendo una variabilidad litológica a lo largo y ancho del “*play*” geotérmico, en la porción occidental se reconocen afloramientos de edad Oligoceno-Mioceno asociados a un vulcanismo post-caldera de composición máfica e intermedia. Mientras que en la zona centro comienza la transición de un vulcanismo intermedio a uno más ácido, reconociendo secuencias piroclásticas de Riolita-Dacita y vidrio volcánico. Y en la sección oriental se reconocen secuencias vulcanoclásticas mucho más ácidas con intercalaciones de derrames máficos (basaltos), indicando la naturaleza bimodal de la FVTM.

La configuración del mapa geológico (

Figura 1) consistió en la adaptación de la información litológica tomada de los archivos vectoriales descargados de la base de datos del SGM. Debido a que la zona de estudio presenta una dimensión escalar de 1:670 000, se utilizaron los datos vectoriales escala 1:250 000 de las cartas F1411 y E1420 para cubrir toda la zona del “*play*” geotérmico.

Con ayuda de Google Earth y las cartas geológico-mineras 1:50 000 se localizaron los aparatos volcánicos de mayor relevancia, incluyendo algunas elevaciones topográficas de naturaleza volcánica que fueron erosionadas y las cuales conservaron débilmente su morfología original. Para poder identificarlas en el mapa se verificó la simbología de las cartas geológico-mineras, y aquellos elementos topográficos que fueron descritos en la cartografía como aparatos volcánicos (domos, cráteres, calderas y conos cineríticos).

A pesar de la gran variedad geológica de la zona de estudio, pero principalmente litológica, se seleccionaron las rocas de origen ígneo, con el fin de obtener un mejor análisis espacial de estos afloramientos e ir focalizando la dimensión para su asociación con la fuente de calor del “*play*” geotérmico.

4.2.3. Crono-estratigrafía

La variable crono-estratigrafía describe las épocas geológicas de mayor importancia para la acumulación de calor geotérmico con base en los eventos geológicos que las definen. La litología está estrechamente ligada

con esta variable, puesto que los eventos eruptivos más recientes son los que permiten la definición espacio-temporal de este parámetro, Prol-Ledesma y Morán-Zenteno (2019) definen al vulcanismo reciente como aquel con edad ≤ 3 Ma. De acuerdo con esta información se definen las 3 épocas de mayor relevancia para la ubicación de actividad volcánica reciente: Holoceno, Pleistoceno, Plioceno. Con este intervalo de tiempo se infirieron las áreas de acumulación y preservación de calor en la zona de estudio.

4.2.4. Flujo de calor

El flujo de calor es la disipación de la energía térmica a través de procesos de conducción y/o convección que forman a los sistemas geotérmicos (CeMIEGeo, 2014-2019). De acuerdo con Robilliard-Chiozza (2009), la geotermia aplicada es el estudio y utilización de la energía térmica; energía que es transportada a través de la roca o de fluidos y que asciende desde el interior de la corteza terrestre hasta la superficie, dando origen a los sistemas geotérmicos.

La herramienta elemental de la variable de flujo de calor fue el mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos en México de Prol-Ledesma *et al.* (2018), el cual fungió como mapa base para la digitalización de las anomalías de calor de la zona de estudio.

El proceso consistió en georreferenciar este mapa en la zona de estudio, para posteriormente digitalizar las líneas de flujo de calor y por medio de un proceso similar al de un Modelo Digital de Elevación (MED), generar las áreas de alcance de estas isolíneas agregando sus valores térmicos correspondientes y así obtener los mismos valores del mapa original.

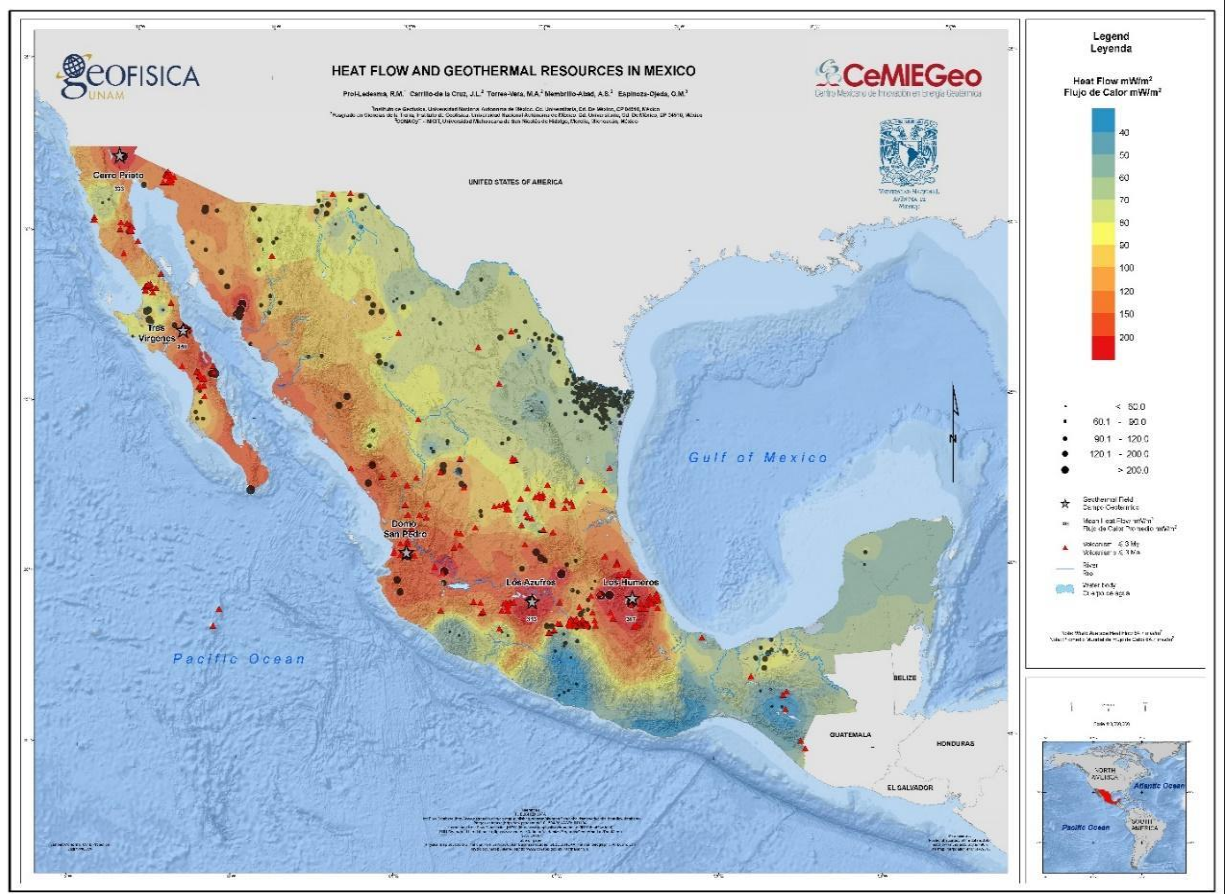


Figura 6. Mapa de flujo de calor y recursos geotérmicos en México (tomada de Prol-Ledesma *et al.*, 2018).

El producto cartográfico obtenido por la digitalización de estos valores es el que se muestra a continuación.

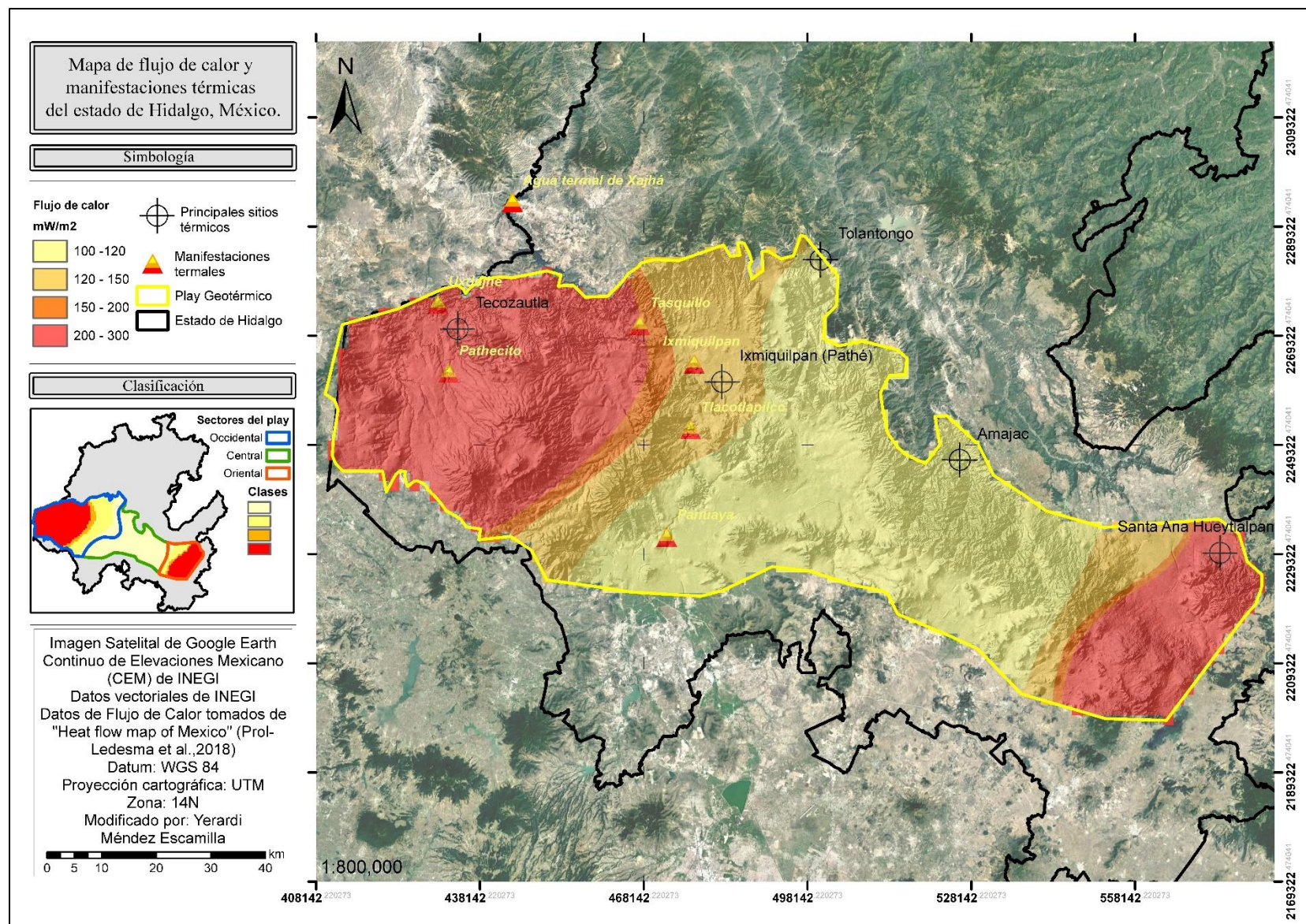


Figura 7. Mapa de flujo de calor y manifestaciones geotérmicas del estado de Hidalgo.

Cabe resaltar que este tipo de información permite inferir el valor térmico real de un yacimiento geotérmico, porque es necesario conocer la cantidad de calor disponible en la roca, la cual se expresa con su densidad en mW/m^2 (Sas *et al.*, 2018).

Es importante mencionar que esta metodología (digitalización de información previa) fue necesaria debido a la escasez de datos térmicos en el estado de Hidalgo, los cuales se obtienen de una base de monitoreo de pozos de exploración geotérmica.

4.2.5. Geofísica

La variable hace referencia a la geofísica empleada para la caracterización del “*play*” geotérmico. Los métodos geofísicos se basan en el estudio de diferentes campos físicos que se propagan en el interior de la Tierra. Los campos geofísicos más importantes son el campo gravitacional y el magnético. Los valores observados de estos campos dependen de las propiedades físicas de las rocas, además, son relevantes para la exploración y producción de yacimientos no convencionales (Zhdanov, 2015).

4.2.5.1. Caracterización Geofísica

Poletto *et al.* (2018) afirman que la caracterización Geofísica permite conocer el comportamiento físico-térmico del depósito y se puede obtener información del subsuelo que facilite la comprensión del yacimiento.

Para el procesamiento de la información geofísica se utilizaron datos aero-magnéticos digitalizados de las cartas de magnetometría aérea del Servicio Geológico Mexicano (SGM). Se delimitó la zona de estudio sobre esta información y se generó un archivo ráster que contiene valores de anomalía magnética de la zona de estudio, aplicando correcciones y/o filtros para inferir los cuerpos geológicos que generan dichas anomalías. Cada uno de los filtros de realce se aplicaron para hallar el mapa magnético con la mejor definición de los cuerpos anómalos.

La primera corrección que se aplicó al campo magnético fue la Reducción al Polo (RP). La RP simula llevar el área de estudio al polo magnético donde la inclinación es igual a 90° y la declinación es de 0° , eliminando así la distorsión que existe del campo magnético en las diferentes latitudes de la Tierra y ubicando las anomalías magnéticas sobre las fuentes que las producen (Fantón *et al.*, 2015). El campo magnético reducido al polo muestra las variaciones físicas de las anomalías magnéticas muy cercanas a su fuente, tal como se muestra en la figura 8.

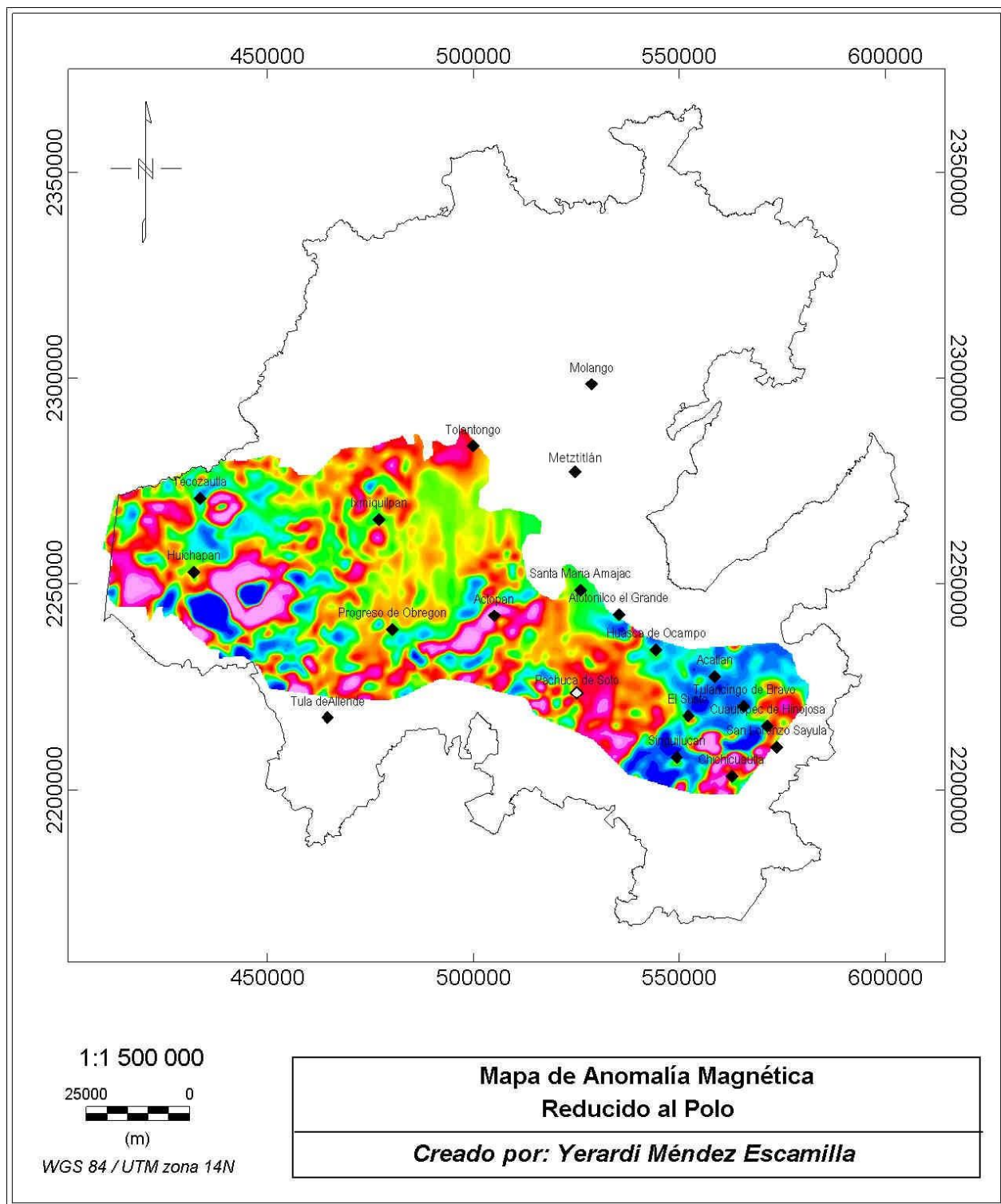


Figura 8. Mapa de campo magnético reducido al polo.

A la RP se le aplicó el algoritmo matemático de la Primera Derivada Vertical (1DV), la cual permite focalizar las anomalías que proceden de fuentes someras y las homogeniza de modo que se delimita con mejor exactitud la geometría de tal fuente (figura 9).

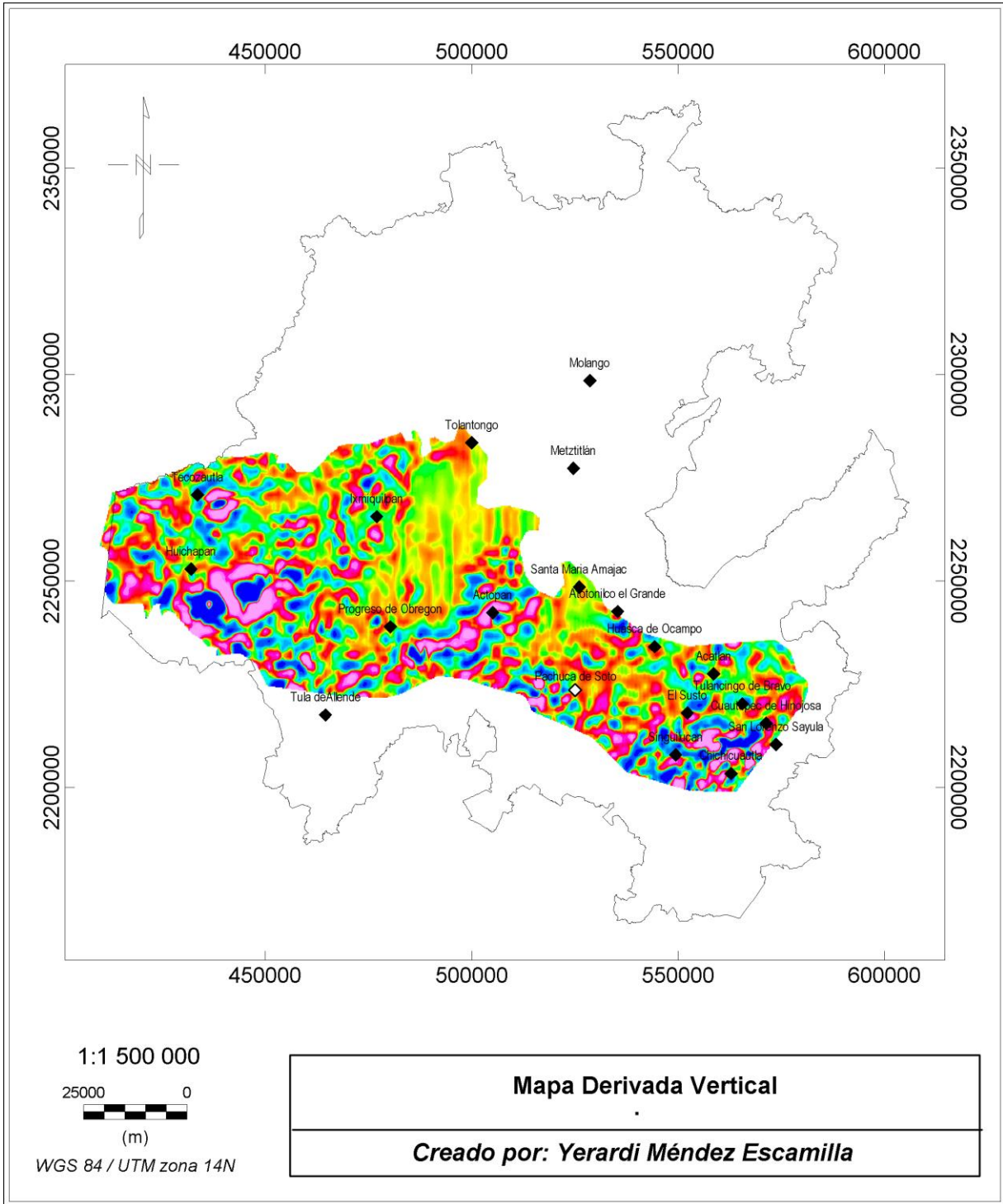


Figura 9. Mapa de Primera Derivada Vertical.

Como se puede ver en la figura 9, se han definido de mejor manera algunos bordes de las diferentes anomalías, las cuales están asociadas a fuentes someras, también es posible aplicar derivadas horizontales,

así como de orden fraccional. Para este caso, solamente se trabajó con la componente vertical y posteriormente se aplicó la derivada fraccional.

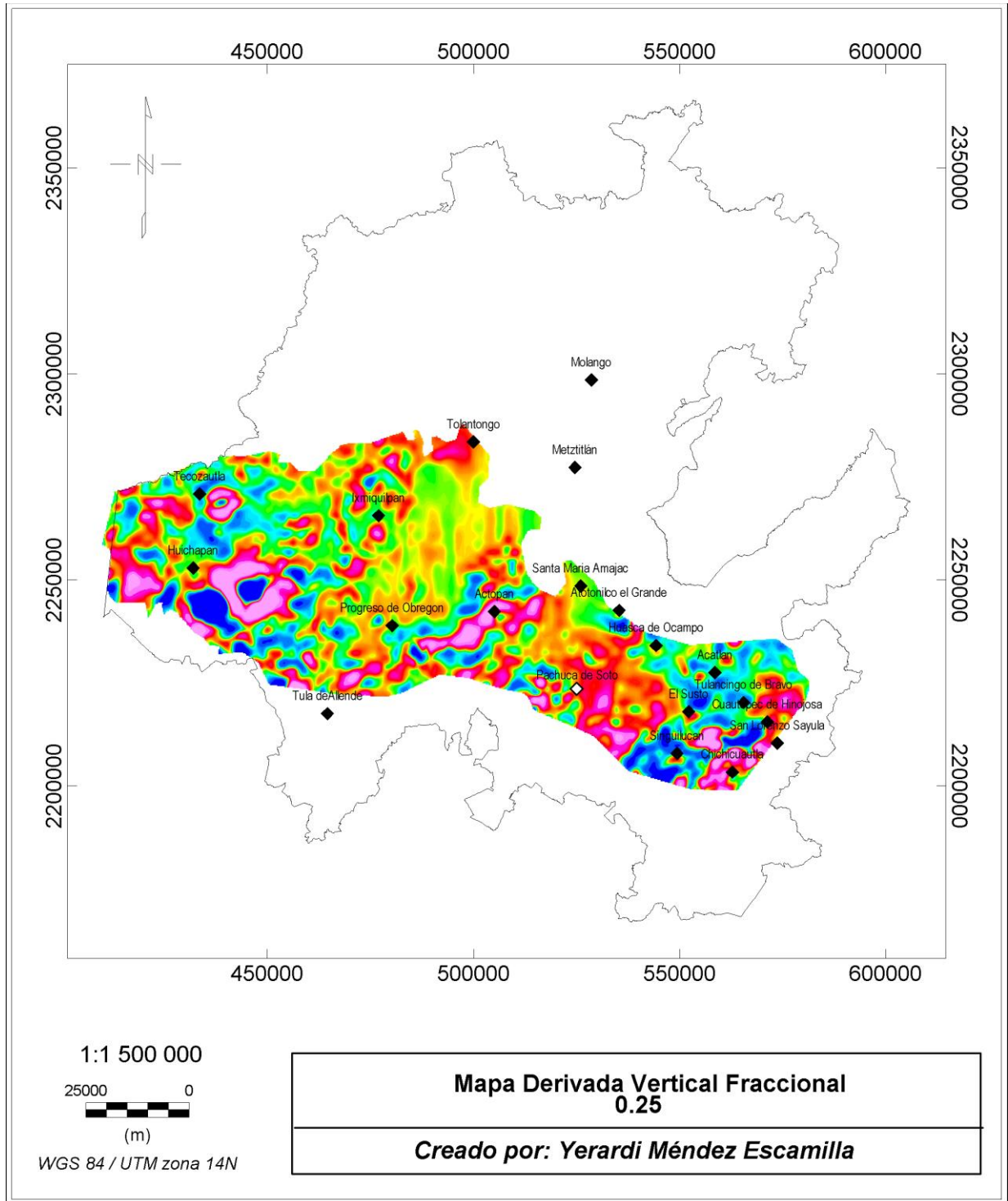


Figura 10. Mapa de Derivada Fraccional Vertical de orden 0.25.

La derivada fraccional que se aplicó al campo magnético fue de orden 0.25, se realizó para observar las diferencias con la derivada de grado 1 (primera derivada) y poder determinar en cuál de las dos es posible observar menos ruido y una mejor delimitación de las anomalías, ya que el principal objetivo de las derivadas fraccionales es eliminar la distorsión de la señal debido a efectos de borde causados por la aplicación de las derivadas convencionales.

Para hacer un mejor análisis de las diferentes anomalías, se realizó una corrección diferente, denominada relación de Poisson. Esta consistió en la conversión de las anomalías magnéticas a anomalías gravimétricas, y así generar un mapa de pseudo-gravedad a partir de los potenciales magnéticos. En la siguiente figura se muestra este mapa.

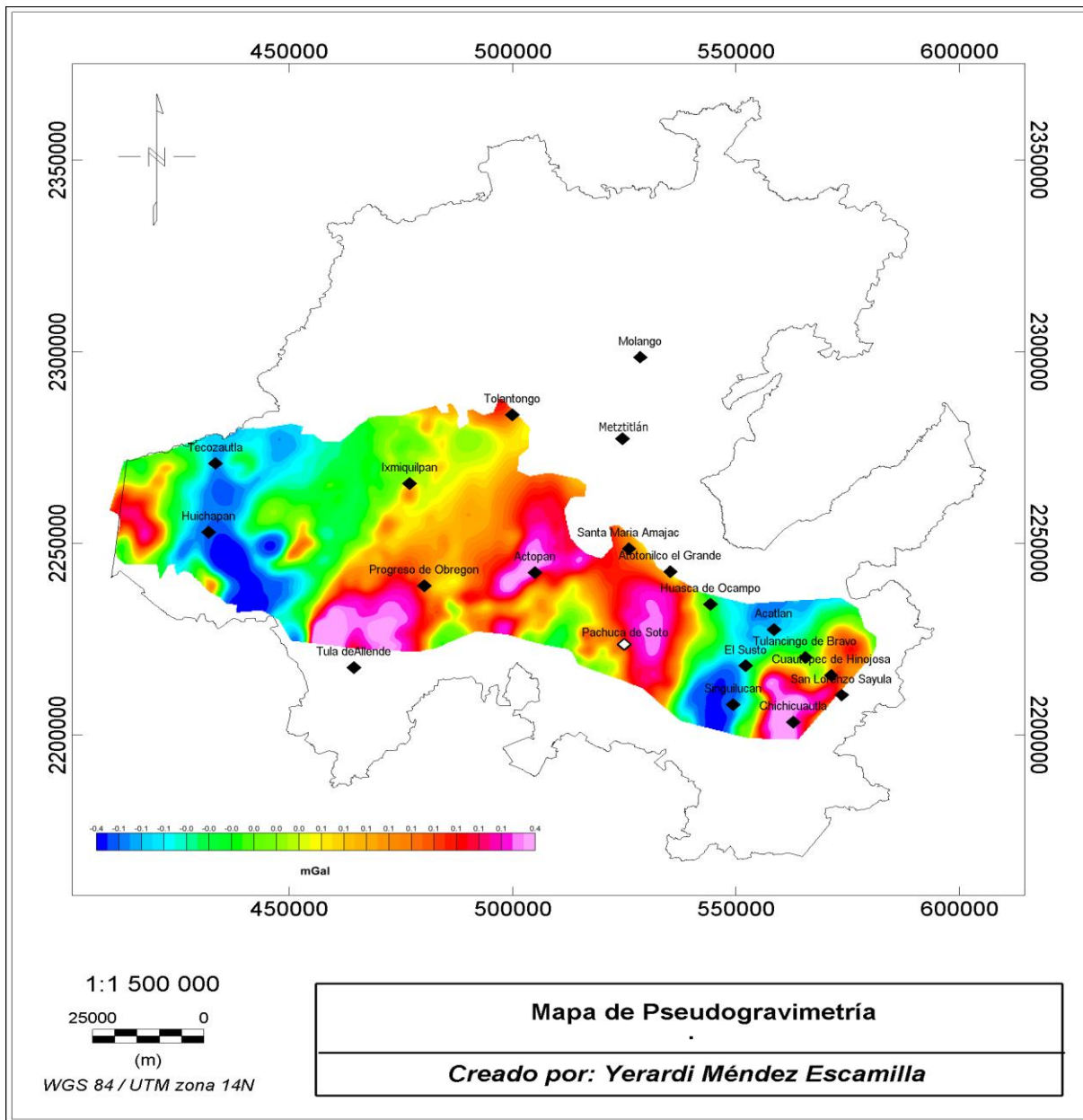


Figura 11. Mapa pseudo-gravimétrico.

Como se puede observar, las anomalías de densidad son algo difusas, no definen con exactitud el cuerpo que las genera, provocando que la interpretación y/o asociación de las anomalías sea muy poco precisa. Si bien, cada corrección mostró diferencias en la amplitud e intensidad de las anomalías, en el presente trabajo sólo se tomaron en cuenta los filtros que mostraron una mejor calidad de la información y correlación con las estructuras asociadas a la formación de un “play” geotérmico.

Por lo tanto, para el caso de la variable geofísica se utilizaron los valores obtenidos del campo magnético reducido al polo para realizar el proceso de reclasificación.

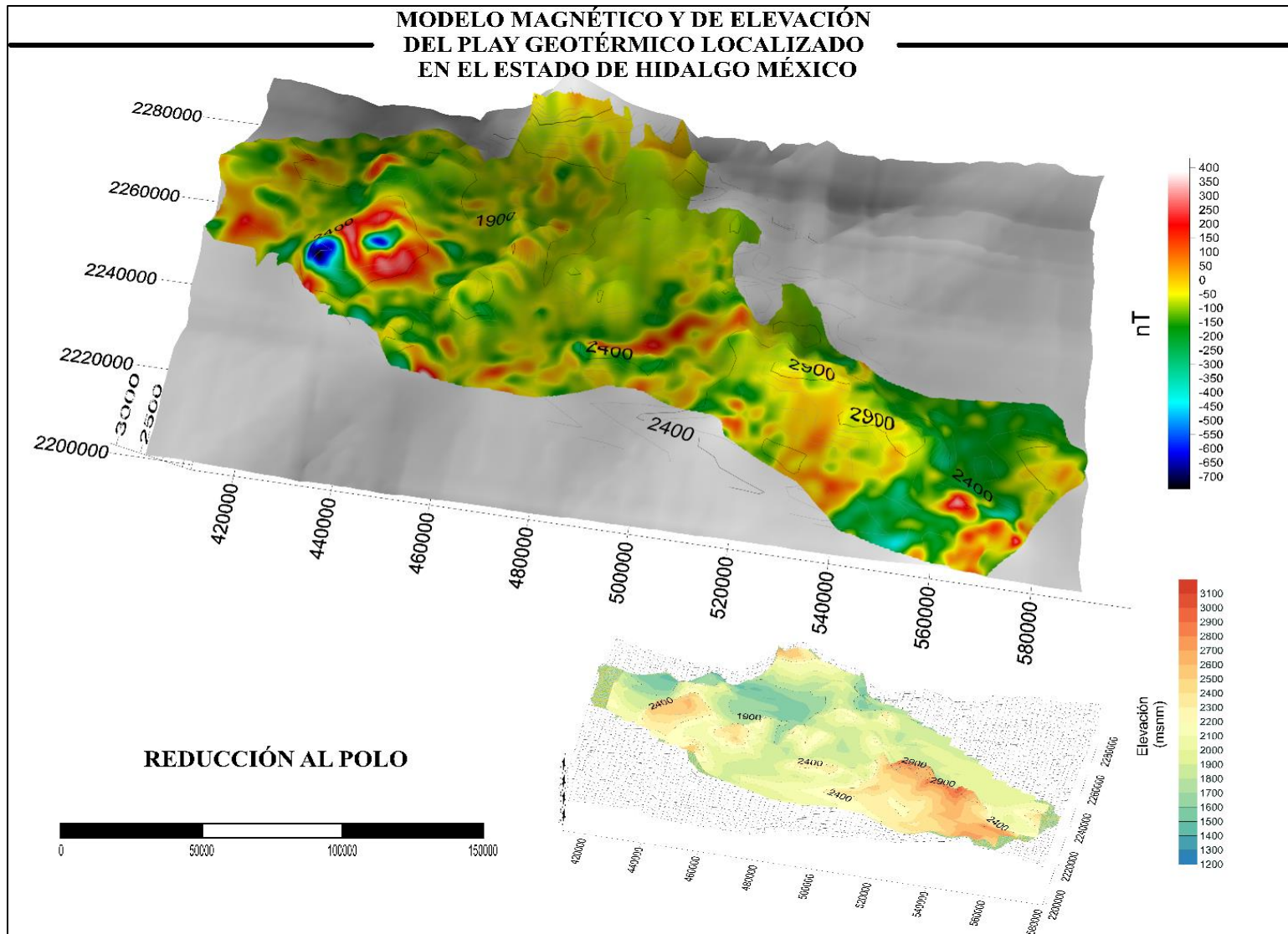


Figura 12. Modelo tridimensional del campo magnético reducido al polo del “play” geotérmico

En la figura 12 se puede observar el mapa de RP de la zona de estudio con un modelo de alto relieve, en donde se observa con mayor definición las anomalías sobre los cuerpos que las generan, las cuales tienen una correlación con las variables de geología (depósitos volcánicos de periodos recientes) y geomorfología (cráteres y volcanes antiguos) como zonas de interés geotérmico (estructuras más cercanas a las fuentes de calor).

En la mayoría de las imágenes en la zona central se observa una distorsión de los valores, esto es a causa del ruido magnético que hay en la región causado por cuestiones ajenas al levantamiento magnético.

4.3. RECLASIFICACIÓN

Cada una de las variables descritas anteriormente se sometieron a un proceso de reclasificación a partir de SIG. Las variables se reclasificaron con el fin de conjuntar en clases la relevancia para la determinación de potencial geotérmico de acuerdo a los elementos que las componen (tabla 2).

Es importante mencionar que el número de clases se asignó considerando 4 categorías de clasificación: bajo, medio, alto y muy alto potencial. Por esta razón se consideraron únicamente clases que van de 1 a 4, siendo el número más alto la clase de mayor valor o relevancia.

En la tabla 2 se muestra la información utilizada en la reclasificación de cada una de las variables, la cual se obtuvo a partir del ordenamiento de las variables del análisis de las propiedades que representan (elevación, litología, edad, energía térmica [flujo de calor], y susceptibilidad magnética). En la columna de los elementos que componen la clasificación se ordenan de acuerdo a la propiedad que miden y representan, así como el valor real que manejan, la relevancia que tienen para la determinación de potencial geotérmico y la clase correspondiente.

Tabla 2. Clases para la reclasificación de las variables que permiten la formación de un “play” geotérmico.

Variable	Elementos	Propiedad	Valor			Relevancia para la determinación de posible potencial geotérmico	Clase
			NW	Centro	SE		
Geomorfología	Llanura	Altura (msnm)	1191-1830	1500-2000	2051-2170	Medio	2
	Pie de monte		1831-1900	2001-2050	2171-2200	Bajo	1
	Ladera		1901-2020	2051-2120	2201-2300	Bajo	1
	Montaña		2021-2430	2121-2850	2301-2600	Medio	2
	Ruina Volcánica		2431-2600	2851-3000	2601-2860	Alto	3
	Cráter		2601-3032	3001-3121	2861-3184	Alto	4
Geología	Andesita-Basalto	Litología relacionada con vulcanismo reciente	Alto/Muy Alto			Alto	3
	Basaltos		Alto/Muy Alto			Alto	3
	Andesita-Dacita		Medio/Bajo			Medio	2
	Riolitas -Toba riolítica		Muy alto			Alto	3
	Toba riolítica -Toba dacítica		Muy Alto			Alto	3
	Traquita		Bajo			Bajo	1
	Domos		Medio			Medio	2
	Calderas		Alto			Alto	3
Crono-estratigrafía	Temprano (Holoceno)	Vulcanismo reciente <=3 (Ma)	<= 0.0150 Ma			Bajo	1
	Medio (Pleistoceno)		0.0150 - 3 Ma			Muy Alto	4
	Tardío (Plioceno)		3 - 6 Ma			Alto	3
Flujo de calor	Anomalía de baja amplitud	Flujo de calor en mW/m ²	100 – 120			Bajo	1
	Anomalía de media amplitud		120 -150			Medio	2
	Anomalía de gran amplitud		150 - 200			Alto	3
	Anomalía de enorme amplitud		200 -300			Muy alto	4
Geofísica	Campo magnético anómalo reducido al polo	Anomalía reducida al polo (nT)	-744.6 - -125			Bajo	1
			-125.1 - -85			Medio	2
			-85.1 - -39			Alto	3
			-39.1 - 433			Muy alto	4

4.4. MÉTODO DE SUMA PONDERADA Y ÁLGEBRA DE MAPAS

El método de suma ponderada se utilizó tomando en cuenta los valores de la tabla 2 para conjuntar todas estas variables y poder asignar el valor de cada variable con el cual se ejecutó el álgebra de mapas. Agregar antecedentes del uso del álgebra de mapas para estudiar fenómenos similares. Este método se ha

implementado en diversas áreas de ciencias de la Tierra, por ejemplo, la Hidrogeología para casos de análisis de vulnerabilidad acuífera siendo las metodologías más importantes: DRASTIC, GOD, SINTAC, KARSTIC, entre otros.

Los sitios de favorabilidad geotérmica requieren la conjunción y/o consideración de más de una variable y cada una de estas debe tener mayor peso o importancia que otra ya sea por naturaleza, relación geográfica y otras características.

La técnica basada en álgebra de mapas requiere la ejecución de un algoritmo matemático que permite combinar las variables propuestas, en este caso aquellas que conforman los recursos geotérmicos y que puedan definir a un “play” geotérmico, de acuerdo a la relevancia de cada variable por medio de una clasificación y una asignación de valores basado en el “Método de Suma Ponderada”.

Este método es utilizado en análisis multicriterio o multivariable, en donde tiene la función de conjuntar distintas variables bajo la superposición de pesos ponderados o ponderaciones basados en la importancia relativa del tema analizado (Marcano *et al.*, 2012). En su mayoría la selección de los pesos ponderados (cuales quieran los autores, porque también divergen) son por juicio del analista o por índices predeterminados por la naturaleza de la variable (ESRI, 2016); por lo que en la presente investigación se establecieron los pesos con base en la influencia de cada una de ellas para la configuración de un sistema geotérmico, o sea por juicio del analista. Al utilizar este método se tomó en cuenta el requerimiento de una clasificación general (un valor que todas puedan representar, el cual se asignó en el proceso de reclasificación descrito en la tabla 2) y una ponderación según su importancia para la determinación de potencial geotérmico, dichas ponderaciones se explican adelante; por lo tanto, la fórmula utilizada en álgebra de mapas bajo el “Método de Suma Ponderada” es la siguiente:

$$x_1p_1 + x_2p_2 + \dots + x_n p_n = \sum_{k=1}^n x_k P_k$$

Fórmula 6. Forma básica de la media aritmética ponderada (Rondero, 2010).

Donde,

x : variable

p : valor de la ponderación

n : número de variables

k : ubicación de los pesos o ponderaciones (total)

De este modo, la suma de todas estas ponderaciones asociadas al total de variables analizadas es:

$$N = \sum_{k=1}^n P_k$$

Fórmula 7. Suma de valores ponderados.

Para finalmente obtener la media ponderada en la siguiente fórmula:

$$\underline{x}_p = \frac{\sum_{k=1}^n P_k}{N}$$

Fórmula 8. Media ponderada.

De modo que, siguiendo el propio criterio y para aplicar la fórmula 8, se asignaron los pesos o ponderaciones a las variables que conforman un “play” geotérmico (tabla 3) tomando en cuenta que la suma de los pesos resulte en un total de 1, factor numérico estándar que permite el rango de un índice de valores, o sea se normalizará el rango de análisis reclasificado (Marcano *et al.*, 2012).

Tabla 3. Ponderaciones de las variables.

Variable	Ponderación
G	0.10
O	0.15
E	0.25
C	0.30
F	0.20

En la tabla 3 se muestran las variables analizadas con sus respectivos pesos, con los cuales enseguida se completa la fórmula 9; donde G corresponde a geomorfología, O a geología, E a la crono-estratigrafía, C al flujo de calor y F a las anomalías aero-magnéticas derivadas de la variable geofísica. La ponderación más alta se le asignó al flujo de calor (C) y a la crono-estratigrafía (E), mientras que la geomorfología (G) presentó la ponderación más baja. Esto debido a que los valores térmicos son de mucho mayor importancia y representan directamente el potencial geotérmico de una zona, sin embargo, la geomorfología es una variable para identificar fuentes de calor, pero no indica directamente los valores térmicos.

Quedando la ecuación final de la siguiente manera:

$$\underline{x}_{GOECF} = \frac{G * 0.1 + O * 0.2 + E * 0.2 + C * 0.3 + F * 0.2}{1}$$

Fórmula 9. Ecuación para la determinación de un índice de potencial geotérmico basado en la fórmula de Media ponderada.

Siendo la fórmula 9, el algoritmo matemático competente para ejecutar con álgebra de mapas los valores y obtener un índice de potencial geotérmico: 1 (menor potencial) a 4 (mayor potencial) conservando el rango de valores usados en la reclasificación.

Se realizó el álgebra de mapas con la herramienta “Calculadora Ráster” del software QGIS (versión 3.8.1). En esta herramienta se usaron los archivos ráster correspondientes a las variables y se ordenaron de acuerdo con la fórmula 9. En la figura 13 se muestra el proceso de dicha herramienta.

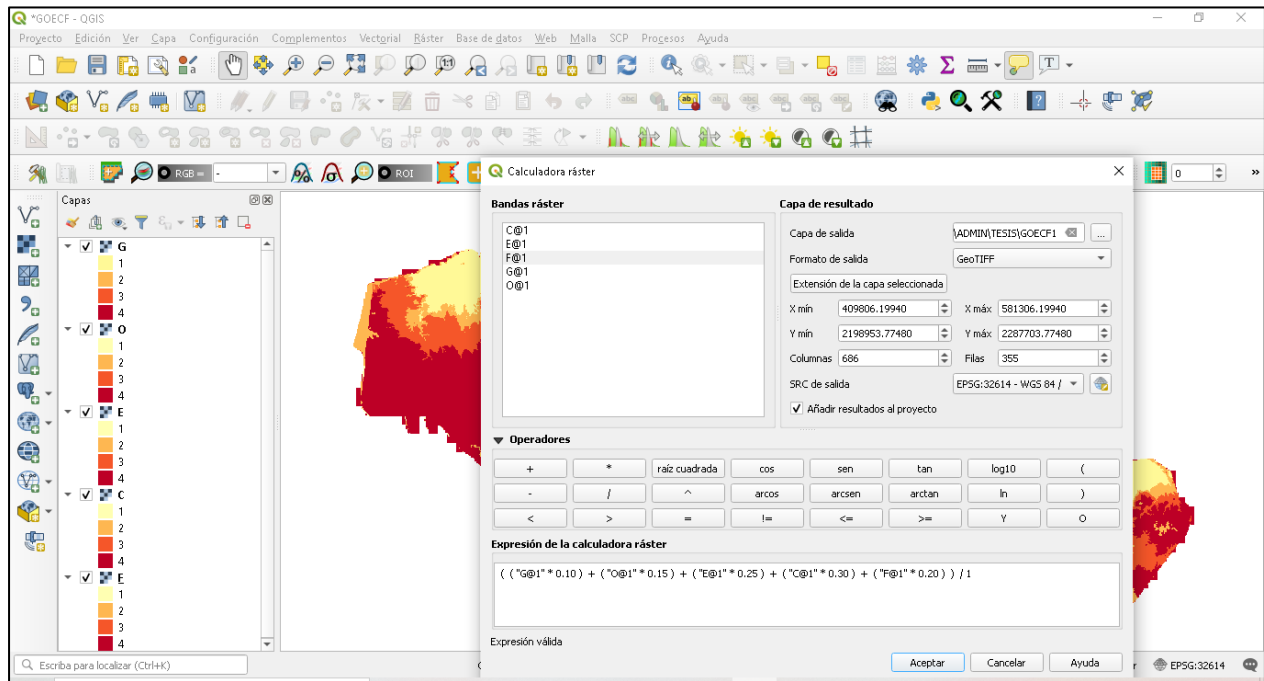


Figura 13. Ejecución de la fórmula 9 por medio de álgebra de mapas.

Cada variable presenta características únicas que definen y favorecen la formación de un “*play*” geotérmico. Las clases observadas en la figura 8 son las que se asignaron en la tabla de reclasificación (tabla 2) en la que se ordenó la información de estas de modo que fuese más fácil decidir la influencia de cada variable y así poder asignar los pesos, y la clase a la que corresponde mejor cada parámetro.

Es importante hacer mención que sin las clases no hubiera sido posible utilizar la “Calculadora Ráster”, la cual es la base del álgebra de mapas, ya que, como cualquier otra calculadora, su forma de trabajar la información es por medio de datos numéricos.

Este proceso permitió la elaboración de la figura 14, la cual delimita las zonas más favorables para la acumulación de energía geotérmica.

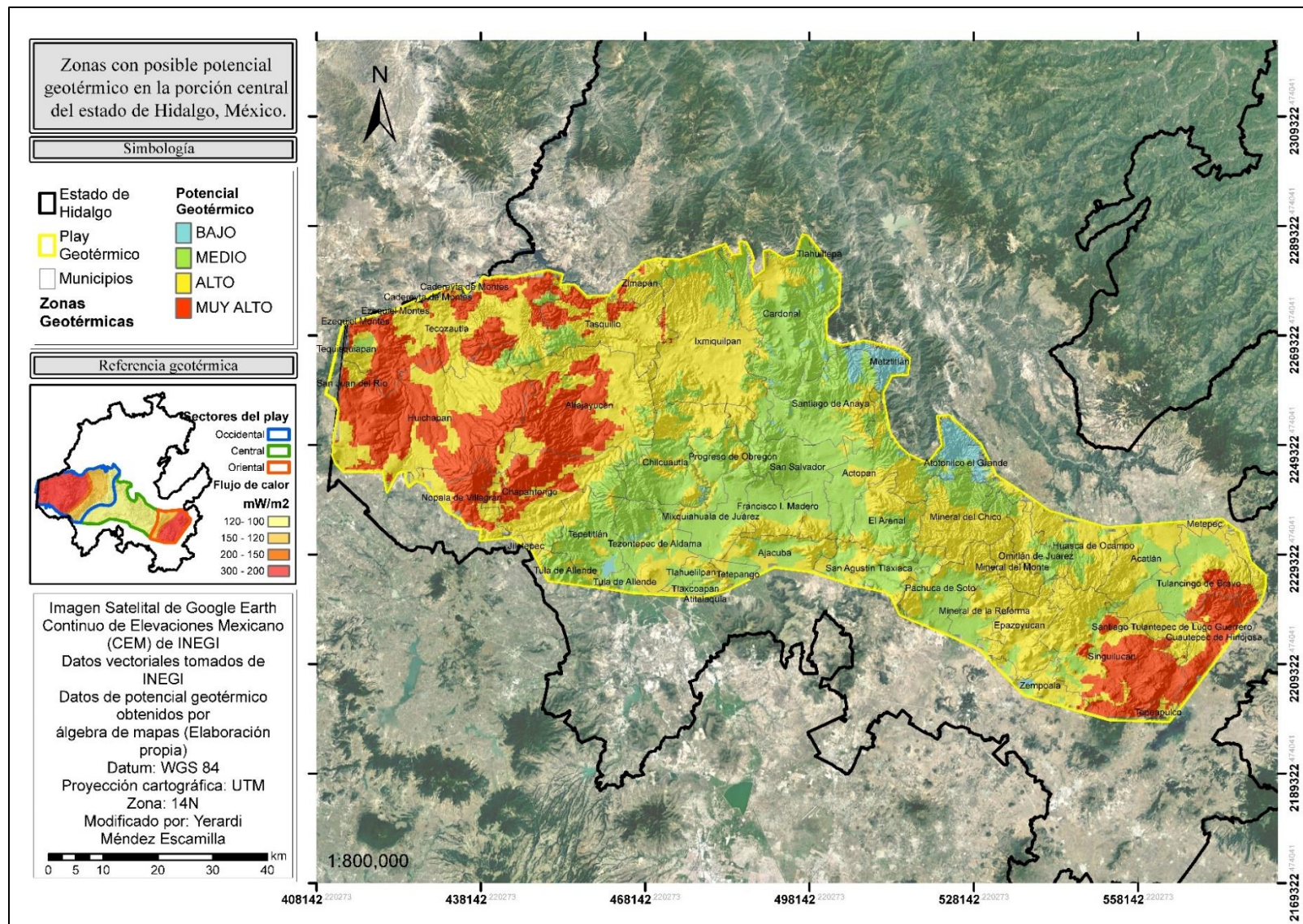


Figura 14. Mapa de potencial geotérmico en la porción central del Estado de Hidalgo, México.

Con este mapa no sólo se localizaron los sitios con mayor probabilidad de albergar energía geotérmica, también se identificaron los sitios menos favorables llegando a la delimitación de dos zonas altamente potenciales: los sectores noroccidental y suroriental.

El sector noroccidental ya ha sido explorado por CFE (Arellano-Gómez, 2008), el sector suroriental no se encuentra suficientemente explorado como región con potencial para el aprovechamiento de energía geotérmica. Por lo tanto, es la zona de mayor interés, ya que no ha sido reconocida con fines de exploración geotérmica. Ambas zonas se priorizaron del resto del área de trabajo obteniendo una delimitación más precisa del sitio con mayor interés geotérmico, creando así el siguiente modelo tridimensional de los sectores NW y SE (figura 15).

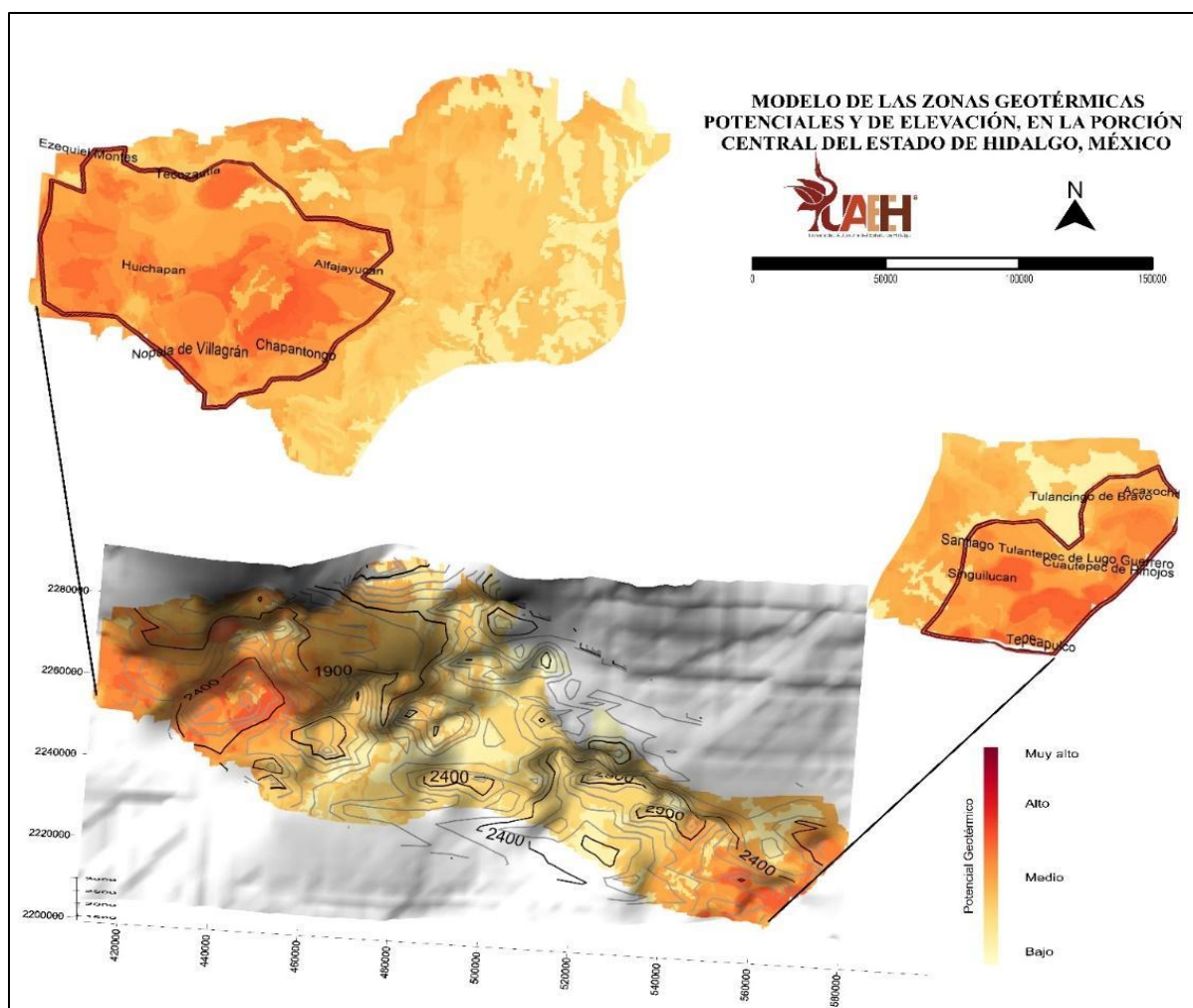


Figura 15. Modelo de índice de potencial geotérmico denotando los sectores NW y SE del Estado de Hidalgo, México.

El modelo de alto relieve del potencial geotérmico observado en la figura 15 permite reconocer que los dos sectores potencialmente geotérmicos coinciden espacialmente con diferentes valles (Valle del Mezquital [NW] y Valle de Tulancingo [SE]) que se encargan de mantener la recarga y descarga de los acuíferos de las zonas (Lesser-Carrillo *et al.*, 2007-2011). Con esta información, se asocia el recurso hídrico como una variable secundaria para definir la futura viabilidad de explotación geotérmica de dichos sectores. Por lo tanto, la situación de sobre explotación de los acuíferos: Valle de Tulancingo, Cuautitlán-Pachuca (sector SE) y Huichapan-Tecoautla (sector NW) no favorece a los sistemas geotérmicos convencionales (hidrotermales).

4.5. DELIMITACIÓN DEL SECTOR SURORIENTAL

La técnica de suma ponderada aplicada bajo el enfoque de superposición de variables permitió cartografiar digitalmente los sitios de mayor favorabilidad geotérmica: sector NW y SE. Considerando que el primer sector ya ha sido explorado para el aprovechamiento de la geotermia, se decidió elegir el sector SE como el mejor sitio para llevar a cabo un análisis cualitativo de mayor detalle. Este sector, al ser de menor dimensión que el sitio descrito en un inicio como “*play*” geotérmico permite obtener resultados con mayor precisión. Esta zona presenta un área de 611 km² y abarca los siguientes municipios: Tulancingo de Bravo, Acaxochitlán, Santiago Tulantepec, Cuauhtepic de Hinojosa, Singuilucan y Tepeapulco.

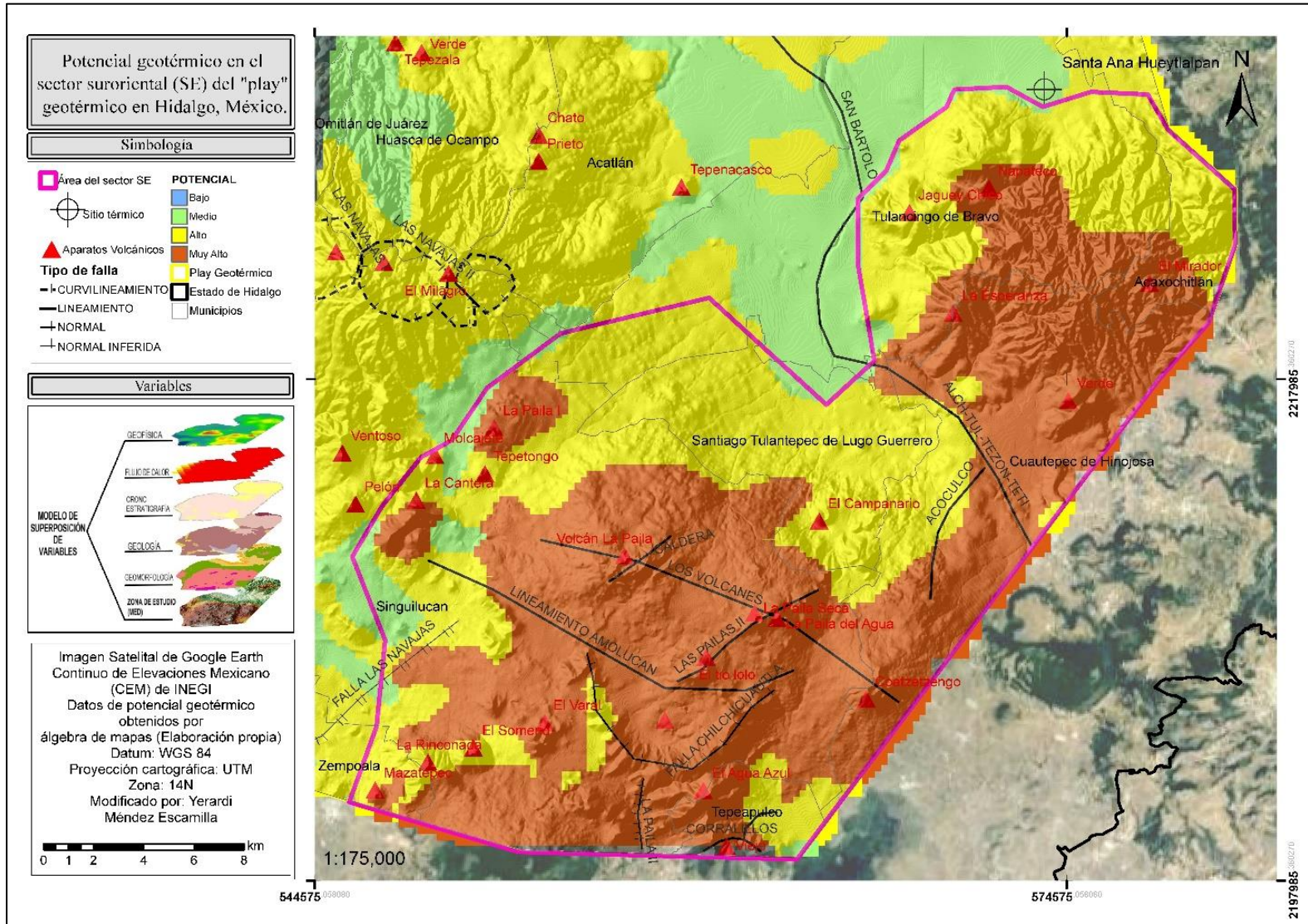


Figura 16. Delimitación del sector suroriental (SE) reconocido como uno de los sitios potenciales para prospección geotérmica en el estado de Hidalgo, México.

En la figura 16 se puede observar que las áreas con mayor potencial según el índice de “Muy alto” (color rojo) circunscriben estructuras geológicas importantes; como lo son, la caldera de Chichicuautila, los conos volcánicos La Paila, Tío Lolo y Coatzetzingo, así como la sierra volcánica de Cuauatepec de Hinojosa en donde se localizan los cerros Napateco, Verde y La Esperanza en los cuales predominan dacitas y riolitas (SGM, 2005).

4.5.1. Columna Estratigráfica

La zona de estudio no había sido investigada con anterioridad para fines exploratorios del subsuelo a gran profundidad, por tal razón, no existe mucha información sobre su estructura. Para conocer a detalle la litología del subsuelo del área de trabajo, es necesario contar con registros de pozos de monitoreo geotérmico o tener acceso a cortes litológicos. Sin embargo, al no contar con tal información, se asociaron los datos de pozos exploratorios más cercanos a la zona de estudio, estos son: EAC-1 y EAC-2 perforados por la CFE dentro del complejo volcánico de la caldera Tulancingo-Acozulco.

En la siguiente figura se ubica por medio de una imagen satelital la localización de los pozos exploratorios de CFE.

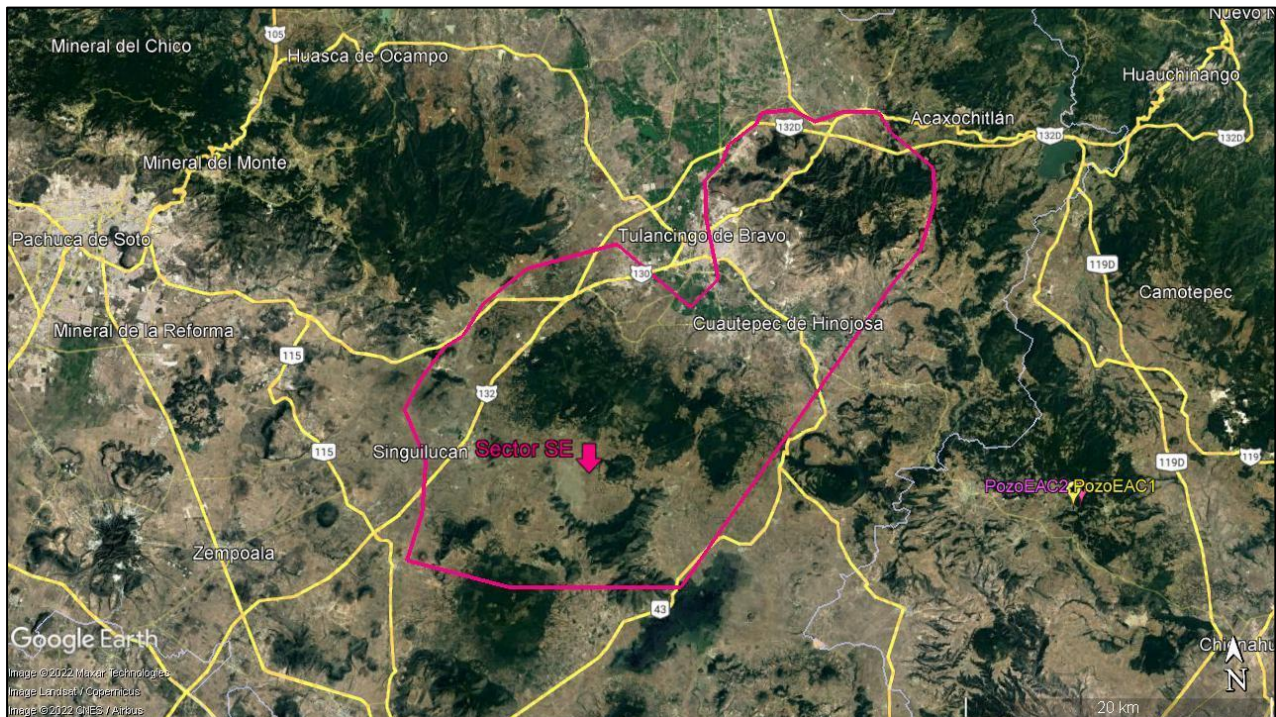


Figura 17. Ubicación de los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 de la zona geotérmica de Acozulco realizados por CFE.

Los pozos se ubican a 30 km aproximadamente al oriente de la zona de estudio, pero, ambas áreas coinciden en situarse dentro del Complejo Volcánico de la Caldera Tulancingo-Acozulco. En esta escala no es posible apreciar la traza que se ha inferido de la gran estructura caldérica, sin embargo, en la figura 18 se observa la circunferencia inferida por Solana (2010).

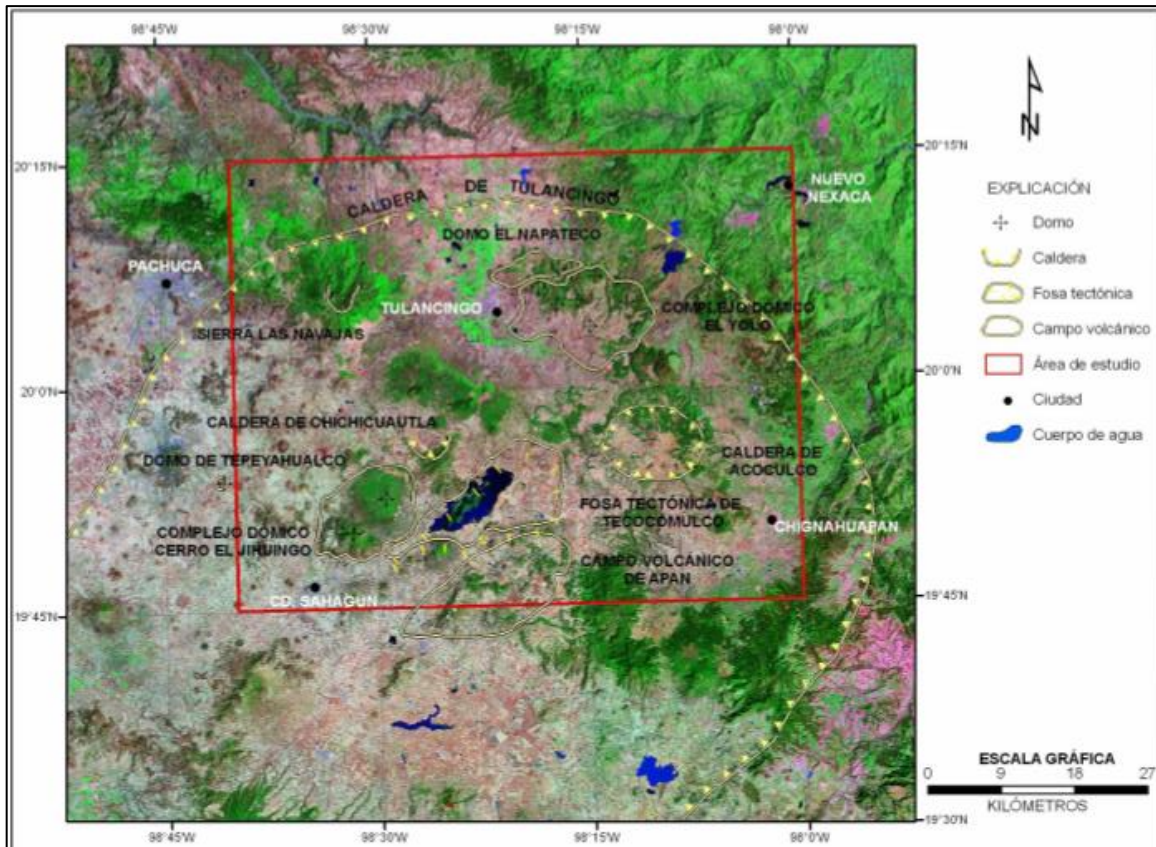


Figura 18. Mapa de estructuras volcánicas (tomado de Solana-López, 2010).

Con base en la columna litológica de estos pozos y la información geológica de Lesser *et al.* (2007) sobre las rocas y materiales que constituyen el subsuelo del sistema acuífero de Tulancingo fue posible inferir las rocas existentes en la zona de estudio. Con este fin, se correlacionó la litología conocida en el subsuelo del acuífero con las rocas identificadas en los pozos de EAC-1 y EAC-2.

La profundidad considerada para hacer dicha correlación fue entre los 500 y 700 m bajo el nivel topográfico promedio, que es 2800 msnm; esto, dado que no se cuenta con más información sobre un nivel topográfico más bajo que el mostrado a continuación. En la figura 19 se muestra el mapa de ubicación de la sección geológica 2-2' tomada de Lesser *et al.*, (2007) en donde se describen las unidades litológicas que forman el subsuelo de la región, así como el perfil geológico modificado de acuerdo a la información requerida para el presente trabajo de investigación.

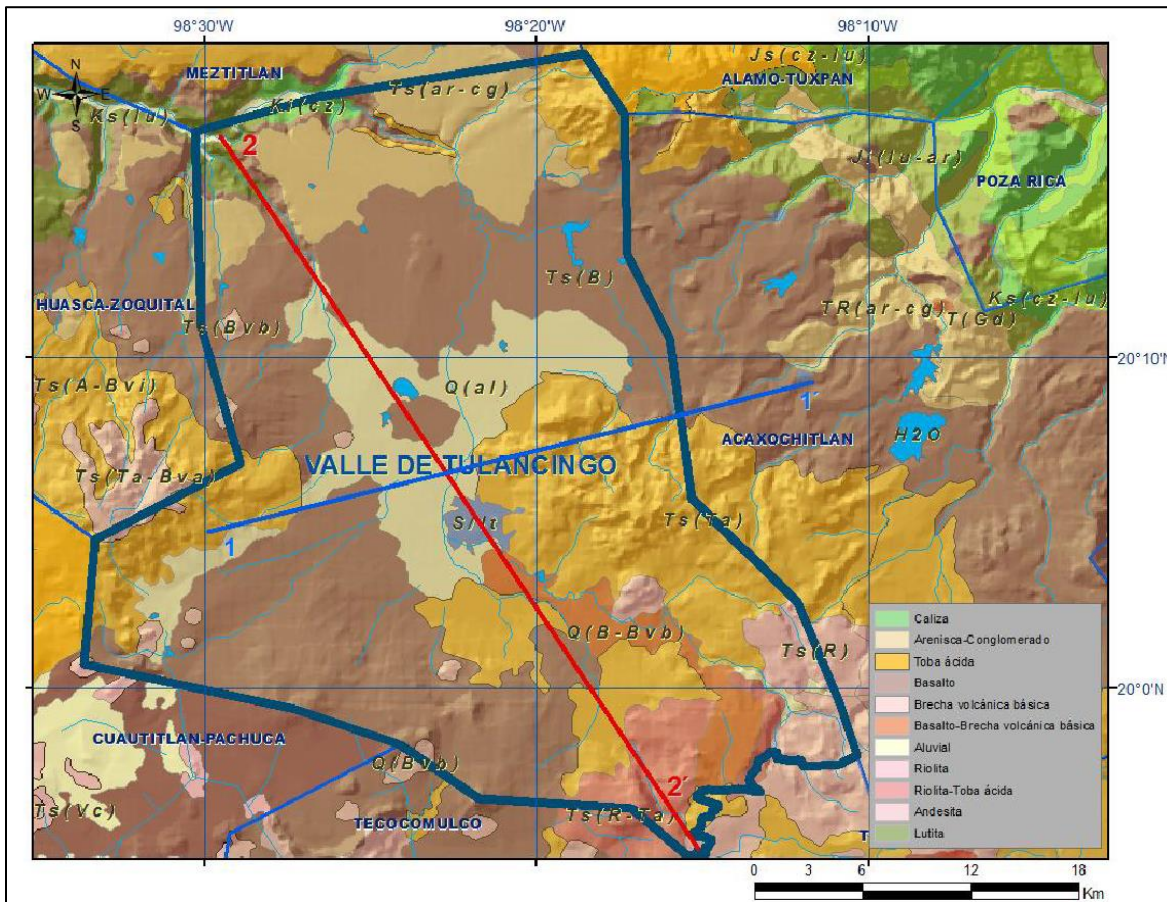


Figura 19. Mapa de localización de las secciones geológicas de referencia para el conocimiento del subsuelo en la región de Tulancingo (tomado de Lesser *et al.*, 2007).

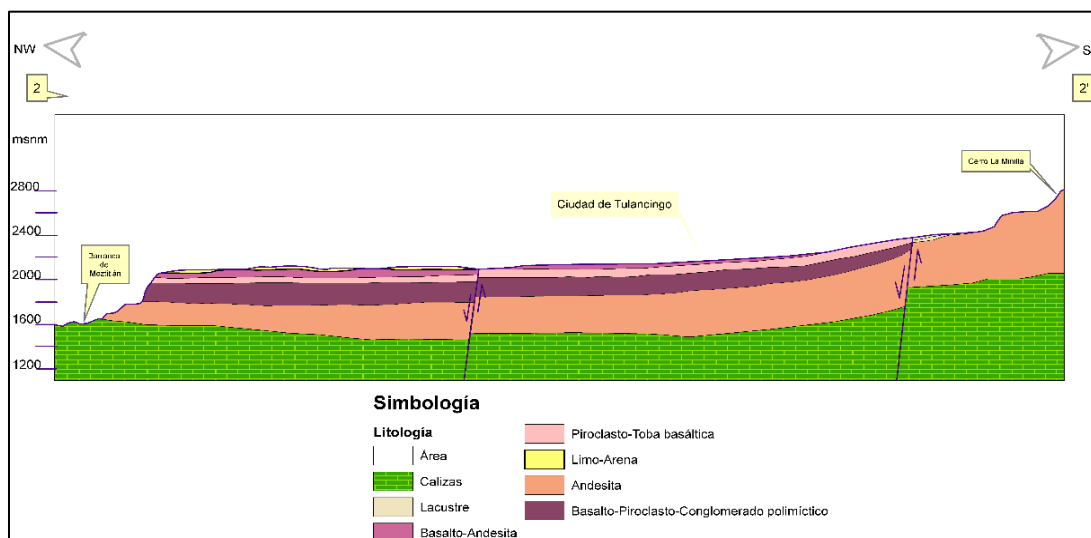


Figura 20. Sección geológica esquemática 2-2' del acuífero de Tulancingo (modificada de Lesser *et al.*, 2007).

En la sección 2-2' (figura 20) se puede observar que los primeros 1000 m de profundidad se componen principalmente de secuencias volcánicas cubiertas por depósitos aluviales, por lo tanto, los 700 m de profundidad establecidos para correlacionar los pozos exploratorios de CFE se conforman por rocas volcánicas.

Este paquete de rocas volcánicas está identificado desde las formaciones más recientes hasta la más antigua reconocidas en la región, la cual corresponde a los basaltos y andesitas del Grupo Pachuca y el Basalto-Piroclasto-Conglomerado polimíctico correspondientes a la Formación Atotonilco.

El Grupo Pachuca es un conjunto de rocas ígneas extrusivas (en su mayoría), piroclastos de composición andesítico-basáltico principalmente del Oligoceno Inferior-Mioceno Superior (Geyne *et al.*, 1963). La Formación Atotonilco es una combinación de depósitos volcánicos y sedimentarios del Plioceno-Pleistoceno donde dominan piroclastos de composición riolítica y basáltica, así como coladas basálticas, además de las rocas clásticas (Lesser *et al.*, 2007).

En el caso de la litología reconocida en los pozos exploratorios de Acoculco, la geología es muy similar a la identificada en el acuífero de Tulancingo al nivel de profundidad correlacionable. En el pozo EAC-1 se encuentra una secuencia de rocas volcánicas del Plioceno, justo a los 700 m de profundidad, correlacionable con la Formación Atotonilco y el Grupo Pachuca en la zona de estudio.

En la figura 21 se muestra la columna litológica del pozo exploratorio EAC-1, en donde se pueden identificar las rocas del subsuelo.

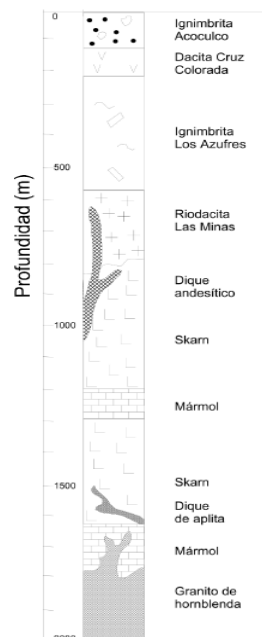


Figura 21. Columna litológica del pozo EAC-1 (recuperada de López-Hernández, 2009).

Los pozos EAC-1 y EAC-2 se perforaron a 2000 m de profundidad. En las figuras 22 y 23 se muestra la litología completa de cada uno de ellos, describiendo las unidades litológicas principales.

Profundidad (m)	Descripción petrográfica simplificada	Observaciones
0-790	Esta unidad está formada, desde la base hacia la cima, por la riocacita Las Minas, la ignimbrita Los Azufres, la dacita Cruz Colorada y la ignimbrita Acoculco.	Esta secuencia volcánica cubre el intervalo Plioceno-Cuaternario.
790-1660	Secuencia de rocas metamórficas compuesta principalmente de skarn y dos zonas delgadas de mármol, una de ellas en contacto con un cuerpo intrusivo.	Esta secuencia es parte de los sedimentos cretácicos de la Sierra Madre Oriental localmente metamorfoseados.
1660-2000	Granito de hornblenda.	Es la unidad más profunda penetrada por el pozo.

Figura 22. Descripción simplificada de la litología del pozo EAC-1 (tomado de Avendaño-Cortes, 2017).

En la figura 22 se puede observar que en los primeros 800 m de profundidad se encuentra una secuencia volcánica del Plioceno-Cuaternario contemporánea a la Formación Atotonilco y a los depósitos extrusivos que la sobreyacen.

En cuanto al pozo EAC-2, los depósitos volcánicos alcanzan un espesor mucho menor, alcanzando el contacto litológico con los sedimentos cretácicos a una profundidad de 350 m.

Profundidad (m)	Descripción petrográfica simplificada	Observaciones
2-340	Ignimbritas, dacitas y andesitas de rasgos primarios relictos por exceso de alteración.	Vulcanismo terciario-cuaternario e hidrotermalismo reciente.
350-450	Calizas lutítico-limolíticas metamorfoseadas y alteradas.	Borde del cuerpo metamórfico de contacto cretácico sin intrusiones diaquísticas salvo en la parte superior.
450-1580	Hornfels de calcita-wollastonita-granate y diópsida intrusionado por cuerpos cuarzo-monzoníticos y micrograníticos.	Metamorfismo de calizas silíceas del Cretácico producido por el intrusivo subyacente y por abundantes cuerpos diasquísticos cuarzo-monzoníticos y por microgranitos.
1580-1900	Granito de hornblenda intrusionando a las calizas. Contiene fragmentos de hornfels derivados de las calizas asimiladas	Granito post-cretácico o cretácico.

Figura 23. Unidades litológicas y descripción petrográfica simplificada del pozo EAC-2 (tomada de Avendaño-Cortes, 2017).

Con respecto a lo observado en las figuras anteriores, los eventos volcánicos y sus productos se depositaron en altitudes similares mostrando una mayor relación con la litología del pozo EAC-1.

En las figuras 24 y 25 se observan evidencias mineralógicas de muestras procedentes del pozo EAC-1 descritas por López-Hernández (2009) con las que es posible comprobar la naturaleza geológica de dichos pozos y su similitud litológica con los afloramientos de la zona de estudio del presente trabajo.

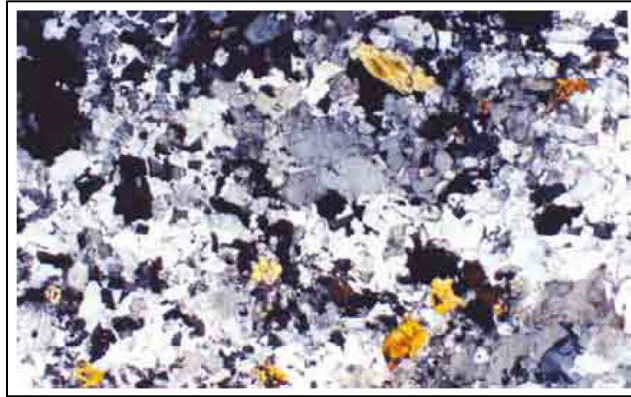


Figura 24. Vista en microscopio del Granito de hornblenda, recuperado a 1614 m de profundidad en el pozo EAC-1. 2.5X, NX (tomada de López-Hernández, 2009).

El Granito de hornblenda se describe como el intrusivo que causó el metamorfismo en la secuencia sedimentaria encontrada al fondo del pozo. El desarrollo textural va de grano fino a grueso a mayor profundidad. La datación de la roca está ausente, pero se considera más antiguo que la actividad ígnea de Tulancingo debido a que no intrusionó la secuencia volcánica reciente y se asocia al intrusivo de la zona de los Humeros, el cual se data a 14 Ma que correspondería a los eventos precursores del campo volcánico de Apan que representa el comienzo del vulcanismo en el sector oriental de la FVTM (López-Hernández, 2009).

Del mismo modo López-Hernández (2009) describe una muestra petrográfica del pozo EAC-1 a una profundidad somera correspondiente al material vulcanoclástico que sobreyace a las formaciones de mayor profundidad, identificándola como la Ignimbrita Los Azufres.

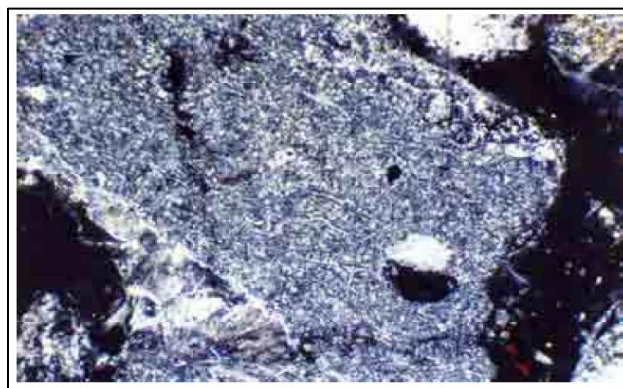


Figura 25. Ignimbrita Los azufres 10X. NX. Recorte del pozo EAC-1 a 370 m de profundidad (tomada de López-Hernández, 2009).

La Ignimbrita Los Azufres se observó solamente en el pozo EAC-1 y se describió como una roca muy alterada por fluidos hidrotermales en una matriz desvitrificada con rasgos texturales asociados a flujos y fragmentos de Andesita con cuarzo, clasificándola como una ignimbrita riolítica silicificada. A pesar de no contar con datación, se le considera como parte del vulcanismo de Tulancingo dada su relación estratigráfica con los eventos piroclásticos de la zona.

La correlación de estos depósitos volcánicos permite conocer en la zona de estudio que provienen de fuentes volcánicas variables, debido a que en su mayoría la composición es andesítica, basáltica y riolítica. En la figura 26 se esquematiza la correlación litológica entre la geología del subsuelo del acuífero de Tulancingo (que cubre gran parte de la zona de estudio) y los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 de la zona de Acozulco.

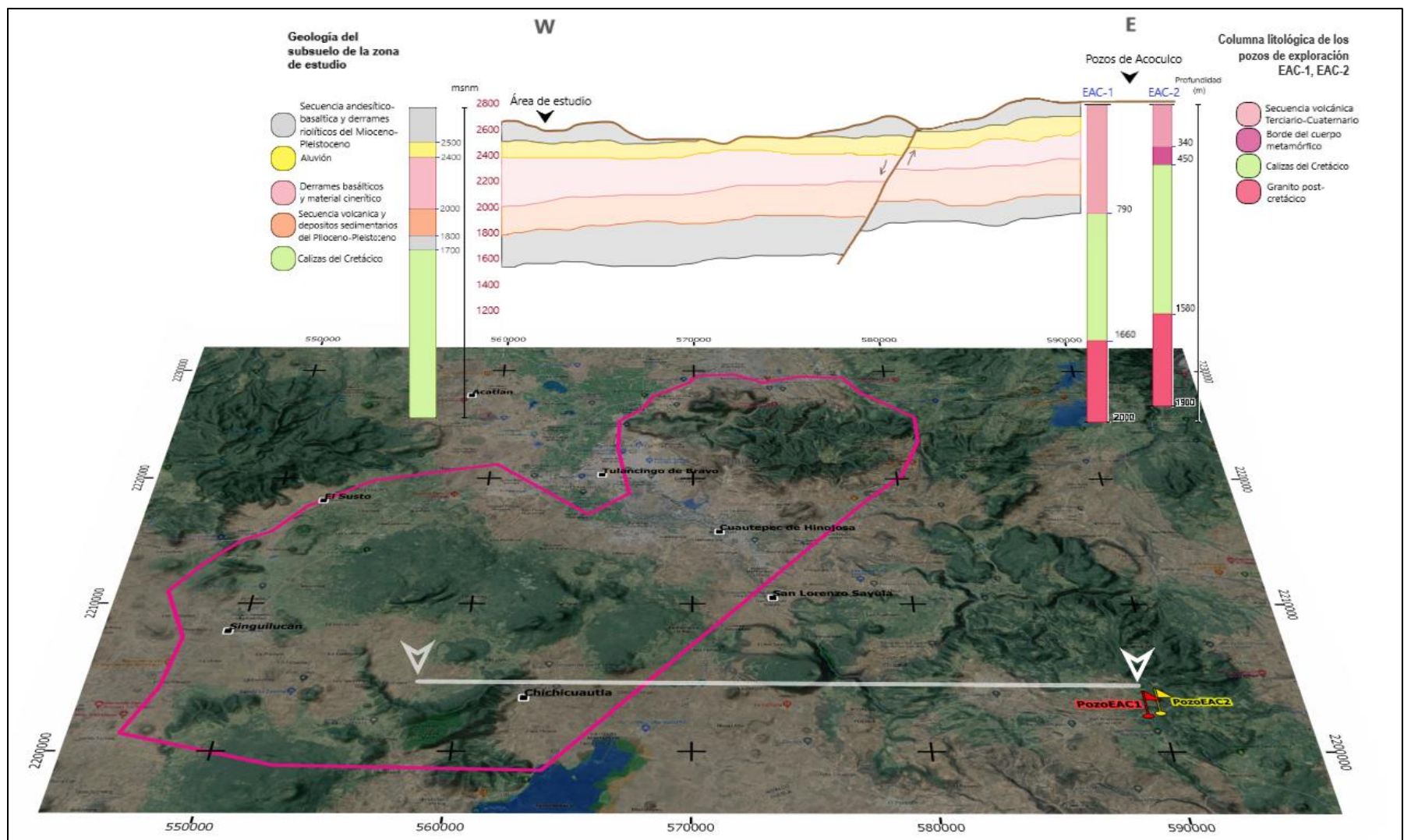


Figura 26. Sección esquemática del área de estudio y los pozos EAC-1 y EAC-2 donde se muestra la relación estratigráfica de las unidades litológicas que integran a cada una de estas zonas.

La figura 26 muestra la relación entre la zona de estudio y los pozos EAC-1 y EAC-2 en cuanto a litología. Cabe mencionar que, estos pozos son las únicas perforaciones que pueden proporcionar información certera sobre la geología del subsuelo.

Por otra parte, debido a que el área de influencia de la Caldera de Acoculco se localiza fuera de la zona de estudio es necesario conocer algunas estructuras localizadas dentro del segmento trazado y así visualizar de una manera más aproximada la relación litoestratigráfica; por tal razón se identificó un elemento estructural relevante en el área de estudio: el Sistema de Fallas Apan-Piedras Encimadas, siendo esta la falla trazada en el esquema de la figura 21.

El Sistema de Fallas Apan-Piedras Encimadas es un sistema regional con tendencia NE-SW e intersecciona con el sistema de fallas Tulancingo-Tlaxco que tiene una tendencia NW-SE representado por lineamientos morfológicos sutiles entre las regiones de Pachuca y Apan (NW de la zona de Acoculco). En el área de Tulancingo-Acoculco las rocas volcánicas cubren el área de influencia del sistema NW y al SW sobre las estructuras con tendencia NE-SW predominan los conos volcánicos y de menores dimensiones como algunos volcanes compuestos que están relacionados con el rumbo NE del lineamiento Apan-Piedras Encimadas (López-Hernández *et al.*, 2009).

García-Palomo (2002) menciona que la cronología de los eventos volcánicos y su estrecha relación con los lineamientos y fallas de la zona de Tulancingo-Acoculco permiten sugerir que estas estructuras volcánicas evolucionaron junto con las fallas regionales desde el Mioceno medio evolucionando eventualmente en el Plioceno, época en la que el vulcanismo monogenético se reactivó.

Considerando la relevancia e influencia de este sistema estructural, Peiffer *et al.* (2014) afirma que la intersección de este grupo de fallas orientado hacia el NE junto con el sistema de dirección NW probablemente favoreció el ascenso del magma en la zona de Acoculco.

4.5.1.1. Secciones geológicas

Se trazaron dos secciones en la nueva zona de estudio, las cuales se localizan en áreas favorecidas por el índice de potencial geotérmico como se observa en la figura 16 (áreas de color rojo correspondiente a “Muy alto” potencial).

En la ubicación de dichas secciones se consideraron las estructuras de la zona, contactos litológicos, geoformas y elementos estructurales tales como fallas y lineamientos. En cuanto a los elementos estructurales, se interseccionaron el mayor número de fallas posibles para poder interpretarlas en el subsuelo. Es importante mencionar que las fallas o aberturas de las rocas facilitan la migración del calor en cualquier medio de transporte (agua y gas) y así puede llegar a niveles más someros del subsuelo en donde se pueden

localizar manifestaciones geotérmicas para una exploración más detallada. La localización de los planos de debilidad se identificó a partir de datos vectoriales, análisis topográfico y mapeos del SGM.

En las figuras 27 y 28 se muestran los perfiles topográficos obtenidos a partir de la delimitación de las áreas más favorables para la interpretación geológica de la zona de estudio denominada “sector suroriental” (SE).

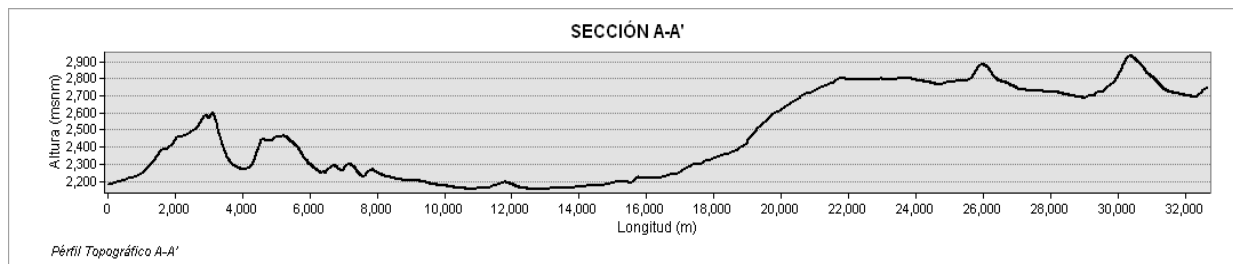


Figura 27. Perfil topográfico de la sección A-A' de la figura 29.

En el caso de la figura 27, la escala corresponde 20:1, siendo veinte veces más exagerada la proyección horizontal (X) con respecto a la vertical (Z).

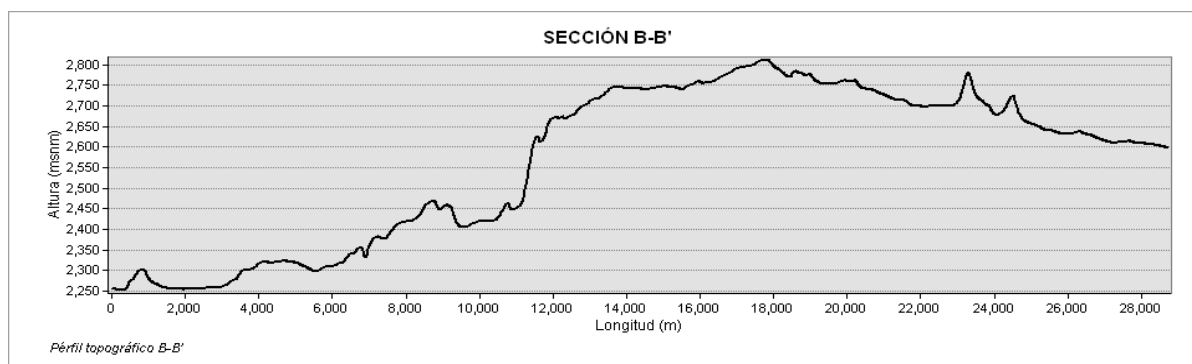


Figura 28. Perfil topográfico de la sección B-B' en la figura 29.

En la figura 28 la escala es 20: 0.5, comprendiendo la relación de 2000 m longitudinales por 50 m en la vertical.

Con base en lo mencionado, se obtuvo el mapa de la figura 29, así como las secciones geológicas: A-A' con una longitud de 32.5 Km y una dirección NNE-SSW y B-B' trazada a una longitud de 28.7 km hacia el SW-NE. Ambas secciones abarcan la mayor área posible de la zona de estudio, descartando la perpendicularidad típica de la intersección de perfiles geológicos para interpretación de terreno.

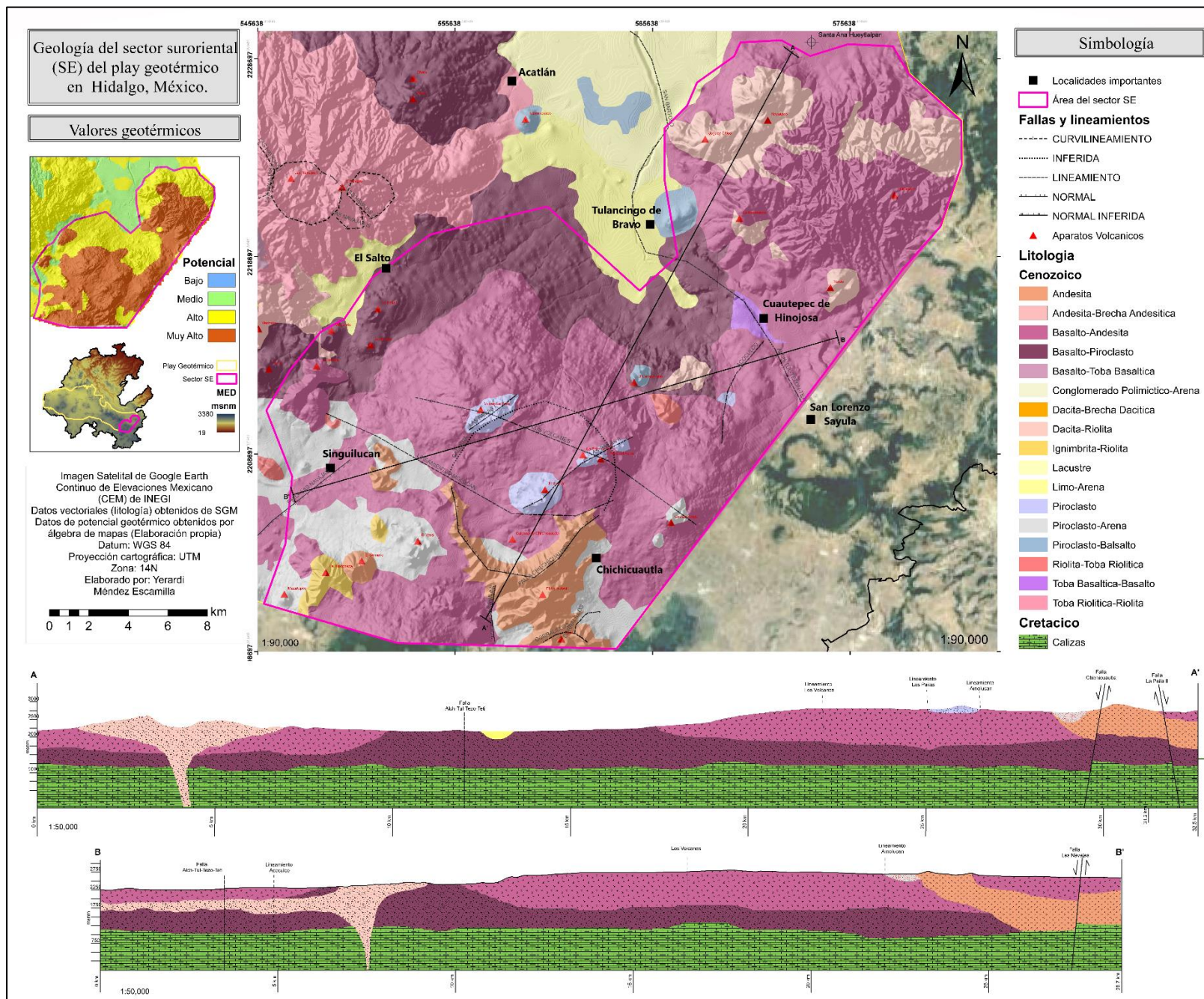


Figura 29. Geología de la zona de estudio denominada sector SE (suroriental) y secciones geológicas.

De acuerdo con la información sobre la geología del subsuelo presentada por Lesser *et al.* (2007) en su trabajo “Balance y Modelo del Acuífero de Tulancingo, Hgo.”, la cual se describió anteriormente, es posible saber que a una profundidad de 1000 m se encuentra una secuencia de rocas volcánicas asociadas a los eventos eruptivos del terciario superior-cuaternario.

De manera general Lesser *et al.* (2007) mencionan que estas rocas pertenecen al Grupo Pachuca (sección esquemática de la figura 17) y de acuerdo con la geología obtenida del SGM, en la zona dominan las rocas de naturaleza volcánica. Las rocas del Grupo Pachuca únicamente afloran al oeste del área de interés y datan de la época del Oligoceno-Mioceno siendo la base del Modelo del acuífero de Tulancingo elaborado por Lesser *et al.* (2007).

De acuerdo con lo descrito en las cartas geológicas de Tulancingo y Sahagún, al basamento volcánico lo sobreyacen las siguientes unidades geológicas (representadas en las secciones geológicas de la figura 29) y datan desde el Mioceno:

- Andesita (Mioceno). Se reconoce como coladas de lava andesítica, expuestas en la parte sur del área de estudio, algunos autores la han denominado como Andesita Apan y Andesita Chichicuahtla, ambas fechadas por medio del método K-Ar, y que reportan edades de 9.82 ± 0.21 y 13.4 ± 0.6 Ma, respectivamente, lo cual ubica a esta unidad en el Mioceno (Serravalliano-Tortoniano); (SGM, 2019).
- Dacita-Riolita (Plioceno). Es una de las unidades litológicas inferidas y correlacionadas con los materiales sub y supra-yacientes, ya que no cuenta con dataciones radiométricas. Se trata de derrames dacíticos y riolíticos intercalados con lapilli y Andesita basáltica del Plioceno (SGM, 2016).
- Basalto-Piroclasto (Plioceno-Pleistoceno). De manera general, esta unidad se integra de flujos piroclásticos que llegan a estar intercalados con otras unidades recientes. Está constituida por lava, capas clásticas, bloques, bombas y niveles de escorias, su distribución predomina al sur. Un afloramiento destacado de esta secuencia es el sitio de “Los Prismas Basálticos” de Huasca de Ocampo, datados en 2.58 ± 0.15 Ma (SGM, 2016).
- Basalto-Andesita (Pleistoceno). Esta unidad litológica mantiene una similitud cronológica con la Riolita Navajas en la parte noroeste del área de interés. Sin embargo, en la zona de estudio se reconoce como el límite crono-estratigráfico entre el Terciario (fin de la Andesita del Mioceno y el inicio del Cuaternario a partir del depósito de material volcánico durante el Pleistoceno). Se describe como derrames de lava basáltico-andesítica expulsados a través de estructuras volcánicas, probablemente de tipo escudo, siendo la unidad de mayor distribución en la zona. Esta unidad cuenta

con dataciones radiométricas, que varían de 2.5 ± 0.7 a 0.54 ± 0.014 Ma, lo que permite ubicarla en el Terciario-Cuaternario (SGM, 2019).

- Piroclasto-Arena (Pleistoceno-Holoceno). Se trata de una secuencia piroclástica compuesta por tobas riolítica y andesítica, lapilli, ceniza, y material piroclástico re-trabajado.
- Limo-Arena (Holoceno). Representan depósitos clásticos no consolidados formados por grava, limo, arena y aluvión, que cubre parcialmente a las unidades anteriormente descritas.

Con respecto al basamento de la región, se cree que bajo todas las secuencias de rocas volcánicas se encuentran las rocas calcáreas del Cretácico, Jurásico y Triásico. De acuerdo con lo descrito por el SGM en la carta geológica de Tulancingo, es posible hallar como basamento sedimentario cretácico a la Formación Soyatal, por lo que se consideran las siguientes unidades:

- Calizas. Esta unidad litológica es reconocida como la Formación Soyatal y está representada como una alternancia de calizas y lutitas de estratificación delgada del Cretácico Tardío (Turoniano-Campaniano), (SGM, sf).

Relación estratigráfica: Formación El Abra y Formación El Doctor, las cuales le subyacen concordantemente en el registro crono-estratigráfico de la región.

- Formación El Abra: complejo calcáreo correspondiente a la parte post-arrecifal o lagunar de plataforma del Albiano-Cenomaniano (SGM, sf).
- Formación El Doctor: se conforma por calizas con intercalaciones de pedernal, dolomita y raramente también de lutitas del Albiano-Cenomaniano (SGM, sf).

Por lo tanto, el subsuelo de la zona de estudio se verá conformado por el basamento calcáreo y sobreyaciendo un potente paquete de rocas volcánicas que se depositaron desde el Mioceno hasta el Holoceno, cubiertas por material aluvial del Cuaternario.

CAPÍTULO V

MÉTODO MAGNÉTICO

5.1. MAGNETOMETRÍA

Dentro de los métodos potenciales (naturales) el método magnético favorece la búsqueda de recursos naturales basándose en las propiedades magnéticas de las rocas.

El método magnético es uno de los más antiguos dentro de las técnicas geofísicas de exploración conocidas, desde tiempos inmensurables, algunas culturas interactuaron con las propiedades magnéticas de los minerales. Finalmente, fueron los chinos durante el siglo IV D.C., quienes a través de la experimentación descubrieron el efecto de orientar la magnetita, y así crearon la brújula como dispositivo de navegación (Reynolds, 1995). Tiempo después, en el siglo XIX, el uso de la magnetometría tuvo mayor reconocimiento como una herramienta de prospección debido a la demanda de metales durante la Segunda Guerra Mundial.

La magnetometría es el método geofísico que mide la variación del campo magnético terrestre a través de un magnetómetro, el cual mide los cambios del campo magnético terrestre, sin embargo, este tiende a cambiar de manera constante. La nanotesla (nT) es la unidad de medida de la intensidad del campo magnético y difiere de acuerdo a la región del globo terráqueo, por ejemplo, varía de 25,000 nT en el ecuador a 70,000 nT en los polos.

Este método identifica las anomalías magnéticas causadas por los materiales ferromagnéticos de las rocas, sedimentos, etc., con el fin de interpretarlas para fines particulares de investigación o aplicación, por ejemplo, para la exploración de recursos minerales, hidrológicos o energéticos.

5.1.1. Campo Magnético

El principio de la magnetometría se basa en la medida y estudio de las variaciones del campo magnético terrestre. Se sabe que la estructura interna de la Tierra está compuesta por capas concéntricas de diferente composición, estas capas son: el núcleo (interno y externo), el manto y la corteza (oceánica y continental).

Esta estructura favorece la comprensión de la estructura interna de nuestro planeta, dichas capas representan el modelo estático (químico o composicional) del planeta y con este modelo podemos saber que el núcleo es una masa compuesta de Hierro sólido internamente y líquido en el exterior (figura 30), el cual, al estar sometido a la dinámica de rotación del planeta produce en consecuencia el campo magnético del planeta.

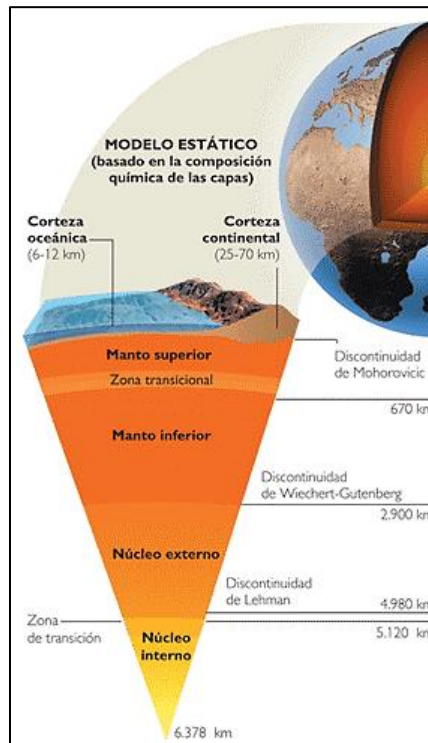


Figura 30. Capas internas de la Tierra: Modelo químico o estático (tomada de Tarbuck y Lutgens, 2005).

De esta manera se concibe el origen del campo magnético como el comportamiento de un “dinamo” gigante. Este concepto, explica el origen del campo magnético terrestre a través de la analogía de una bobina magnética que tiene el mecanismo de convertir la energía mecánica en energía magnética.

El campo magnético se rige por dos polos magnéticos, situados de manera contraria a los polos geográficos y separados por una diferencia angular de casi 12° respecto al eje rotacional de la Tierra llamada, declinación (figura 31).

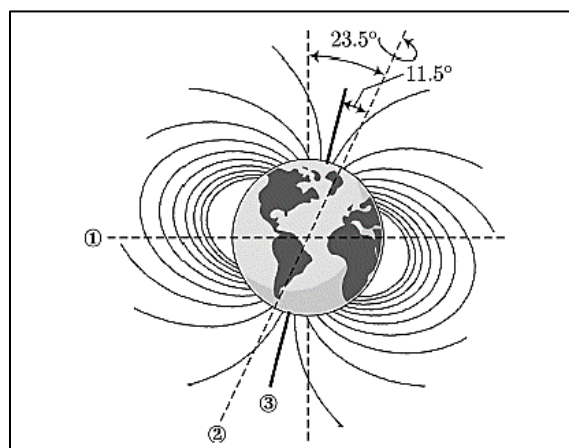


Figura 31. Campo magnético de la Tierra representado por las líneas de fuerza magnéticas salientes del polo Norte (SM), el eje magnético y el plano de órbita ecuatorial (tomada de Calcina, 2009).

El campo magnético está dominado por las fuerzas magnéticas que surgen de los polos Norte (localizado en el hemisferio Sur) y Sur (localizado en el hemisferio Norte), estas fuerzas se conectan durante su trayectoria hasta volver a entrar por los polos.

Los campos elementales del campo magnético de la Tierra son:

1. Campo principal: generado por las corrientes de convección (componente interno).
2. Campo externo: formado por la interacción del Sol y la Luna (componente externo).
3. Campo de la corteza terrestre: formado por las rocas que crean su propio campo.

Cada uno integran el Campo Magnético Total (CMT) de la Tierra y en conjunto determinan el tipo variación magnética que cada uno de los campos presenta y cuál es la de mayor influencia. El campo principal (dipolo principal) integra casi en su totalidad (97 %) al CMT, este no es constante ni rápido, sino que presenta una variación lenta en el tiempo que se conoce como variación secular. Mientras que el campo externo por otro lado es periódico y eventual (2%), además de ser el causante del ruido en la toma de datos, está asociado a la interacción del viento solar con la Tierra (sobre la ionosfera y la magnetosfera). Finalmente, el campo de la corteza (1%) causado por la composición geológica y las estructuras cercanas a la superficie con magnetismo remanente considerable para causar respuestas anómalas o variaciones en el CMT.

5.1.1.1. Componentes del Campo Magnético

El CMT es definido como una magnitud vectorial y como tal se caracteriza por su fuerza, dirección y sentido. La fuerza es la intensidad total F , conocida como el vector resultante de la suma vectorial de sus tres componentes cartesianas (X , Y , Z).

Por lo tanto, el campo magnético se compone de tres elementos conjuntos, dos de ellos definen su dirección, declinación (medida positiva al este del norte geográfico) e inclinación (medida positiva hacia abajo de la horizontal) y uno definiendo la intensidad (Calcina, 2009).

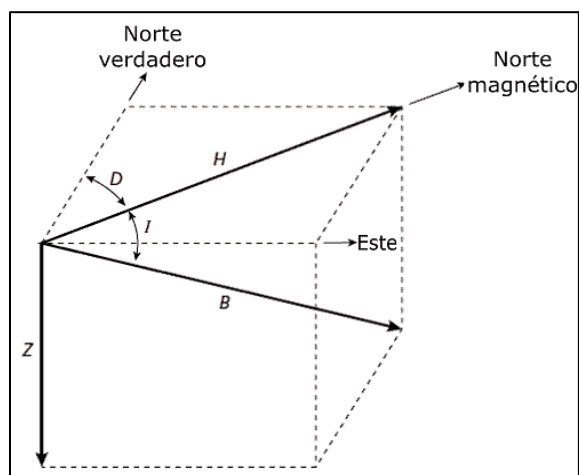


Figura 32. Componentes del campo magnético terrestre (tomada de Lanza y Meloni, 2006).

La composición de X y Y que apuntan hacia el Norte y Este respectivamente dan lugar a la componente horizontal, H.

El ángulo que forma H con el eje X (dirección del Norte Geográfico) es la "Declinación", D. El ángulo que forma H con el eje Z (que apunta hacia el centro de la Tierra) es la "Inclinación", I (figura 32). La proyección de estos vectores está dada por:

$$X = H \cos D ; Y = H \sin D ; Z = F \sin I ; H = F \cos I ; F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

Fórmula 10. Ecuaciones tomadas de Calcina (2009).

Cuando estas tres cantidades son independientes entre sí, son suficientes para determinar el CMT.

En estudios de geomagnetismo la intensidad del campo magnético (F) se representa por medio del sistema de ejes coordenados rectangulares determinados por X, Y, Z. Su magnitud se mide del orden de 30.000 nT en el Ecuador y 60.000 nT en los Polos, siendo su dirección prácticamente horizontal en el Ecuador y vertical en los Polos.

5.1.1.2. Susceptibilidad Magnética de las Rocas

La susceptibilidad magnética (K) es la propiedad de los materiales de magnetizarse y depende estrictamente de la composición mineralógica de las rocas. Esto quiere decir que al someter una sustancia a un campo magnético (H), esta se magnetiza y adquiere intensidad de imantación o magnetización (M) proporcional al campo externo aplicado, dicha propiedad se expresa de la siguiente forma:

$$M = K * H$$

Fórmula 11. Relación del campo magnético y la constante de proporcionalidad K, que es la susceptibilidad magnética con respecto a la intensidad de imantación.

En los levantamientos magnéticos, la susceptibilidad y magnetización remanente de las rocas son las propiedades de interés.

Las rocas con los valores más altos de K, son aquellas con alto contenido en minerales ferromagnesianos y ferromagnéticos. Estas son, las rocas básicas y ultrabásicas (máficas y ultramáficas), las cuales presentan altas susceptibilidades magnéticas mientras que las rocas ácidas (félsicas) y metamórficas tienen valores intermedios a bajos (tablas 4, 5, 6 y 7). En cuanto a las rocas sedimentarias, por lo regular presentan muy baja susceptibilidad (tablas 4, 5, 6 y 7).

Tabla 4. Susceptibilidades magnéticas de rocas comunes (Catalán et al., 2016).

Roca / Mineral	Densidad (10 ³ kg m ⁻³)	k (10 ⁻⁶ SI) = unidad CGS	Masa λ (10 ⁻⁸ metro ³ kg ⁻¹)
Rocas ígneas			
Andesita	2.61	1702 000	6.500
Basalto	2.99	250 – 180 000	8.4 - 6.100
Diabasa	2.91	1.000 – 160 000	35-
Diorita	2.85	630 - 130 000	22 - 4.400
Gabro	3.03	1.000 – 90 000	26 - 3000
Granito	2.64	0 – 50 000	0 - 1.900
Peridotita	3.15	96.000- 200.000	3.000 - 6.200
Pórfido	2.74	250 - 210 000	9.2 - 7.700
Piroxenita	3.17	130.000	4.200-
Riolita	2.52	250 - 38 000	10 - 1500
Rocas ígneas	2.69	2700 - 270 000	100 - 10,000
Rocas ígneas ácidas (promedio)	2.61	38 - 82 000	1.4 - 3100
Rocas ígneas básicas (promedio)	2.79	550 - 120 000	20-
Rocas sedimentarias			
Arcilla	1.70	170 – 250	10-15
Carbón	1.35	25	1.9
Dolomita	2.30	-10 - -940	-1 - - 41
Caliza	2.11	2 -25000	0.1 - 1200
Sedimentos rojos	2.24	10-100	0.5-5
Arenisca	2.24	0 - 20,900	0 - 931
Esquisto	2.10	63 - 18 600	3-
Rocas sedimentarias promedio	2.19	0 - 50 000	0 - 2000

Tabla 5. Susceptibilidades magnéticas y promedios de algunas rocas (España-Bernardino, 2017).

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^{-3}$ (SI)	
	Rango	Promedio
Sedimentarias		
Dolomita	0 - 0.9	0.1
Calcita	0 - 3	0.3
Arenisca	0 - 20	0.4
Lutitas	0.01 - 15	0.9
Ígneas		
Riolita	0.2 - 35	
Gabro	1 - 90	70
Basalto	0.2 - 175	70
Diorita	0.6 - 120	85
Peridotita	90 - 200	150
Granito	0 - 50	2.5

Tabla 6. Susceptibilidades magnéticas de rocas sedimentarias (Pérez-Corona, 2011).

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^{-5}$ (SI)
Aluvión	0.1-0.07
Conglomerado	0.2-0.08
Caliza (Fm el abra)	-0.33 a -0.46
Yeso (Fm Guaxcamá)	-0.1 a -0.26

Tabla 7. Susceptibilidades magnéticas de rocas ígneas analizadas por Aragón et al. (2009).

Tipo de roca	Susceptibilidad $\times 10^{-5}$ (SI)
Ignimbritas	0.0025 -0.1
Domo Dacítico	0.02

Cada uno de los valores señalados de color naranja corresponden al tipo de roca presente en la zona de estudio y por lo tanto son los valores de susceptibilidad utilizados en el modelado magnético.

Para el caso de las rocas cretácicas, las cuales se consideran como posible basamento sedimentario, se eligieron los datos de susceptibilidad magnética obtenidos por Pérez-Corona (2011) correspondientes a calizas, que, a pesar de no ser la misma unidad estratigráfica, presentan similitud en cuanto a las propiedades magnéticas de las rocas que componen a la Formación Soyatal integrada por calizas post-arrecifales del cretácico superior, específicamente del Cenomaniano-Turoniano.

5.1.1.3. Datos Aero-magnéticos

Los datos aero-magnéticos utilizados para el procesamiento e interpretación de las anomalías magnéticas fueron obtenidos a través de la digitalización de las cartas geofísicas elaboradas por el Servicio Geológico Mexicano (SGM). Los datos utilizados son de escala 1:50,000 (regional) y son obtenidos a través de vuelos con dirección norte-sur a una altura sobre el nivel del terreno de 450 m y distancia entre líneas de 1000 m.

Los algoritmos aplicados a las anomalías de los campos potenciales, fueron:

1. Reducción al polo (RP).
2. Primera derivada vertical (1DV).
3. Derivadas fraccionales, para este caso, de orden 0.25 y 0.75 (DF)
4. Señal Analítica (SA).
5. Fase de ángulo TILT (AT).

5.1.1.4. Procesamiento de Datos

Para el procesado de los datos aeromagnéticos de la zona de estudio denominada como “Sector SE” o “suroriental” se aplicaron algoritmos de realce para definir con exactitud rasgos geológicos que lograran relacionarse con la presencia de sistemas geotérmicos en la región. Estas estructuras pueden ser, fallas profundas, cuerpos intrusivos o capas rocosas no aflorantes cada una de estas se relacionan para poder interpretar la existencia de un posible sistema geotérmico.

A partir de la información recabada del área de estudio, se generó a través del programa Oasis Montaj (Geosoft 6.4.2) y de la extensión MAGMAP la interpolación de los datos generando una malla o “grid”, pero considerando distancias en el eje Z, que corresponde al método de interpolación de Mínima Curvatura “Rangrid”.

Por lo tanto, cada proceso geofísico que implique técnicas de realce o definición, se aplican con la intención de obtener información sobre la geología y las estructuras presentes en el subsuelo favoreciendo la exploración y delimitación de estructuras atípicas. En este caso asociadas a posibles recursos geotérmicos,

siendo una herramienta de gran valor si se trata de prospección y exploración de recursos, como por ejemplo recursos hídricos o minerales.

Para el presente trabajo de investigación se obtuvieron los valores de la Anomalía Magnética (AM) y Campo Magnético Residual (CMR) con el fin de conocer la distribución general de las anomalías, sobre todo, los altos magnéticos más notables, así como, las anomalías negativas para poder reconocer los cambios en el campo magnético una vez que este se modifique por los filtros de realce correspondientes, tal como se muestra en las siguientes figuras.

a) Campo Magnético Residual (CMR)

En la figura 33 se ha delimitado con un contorno negro la zona de estudio, donde se identifican 3 altos magnéticos que siguen una dirección preferencial NW-SE. Además, se reconoce también una anomalía negativa justo en el centro de la zona, que de la misma manera sigue la tendencia direccional de los rasgos positivos.

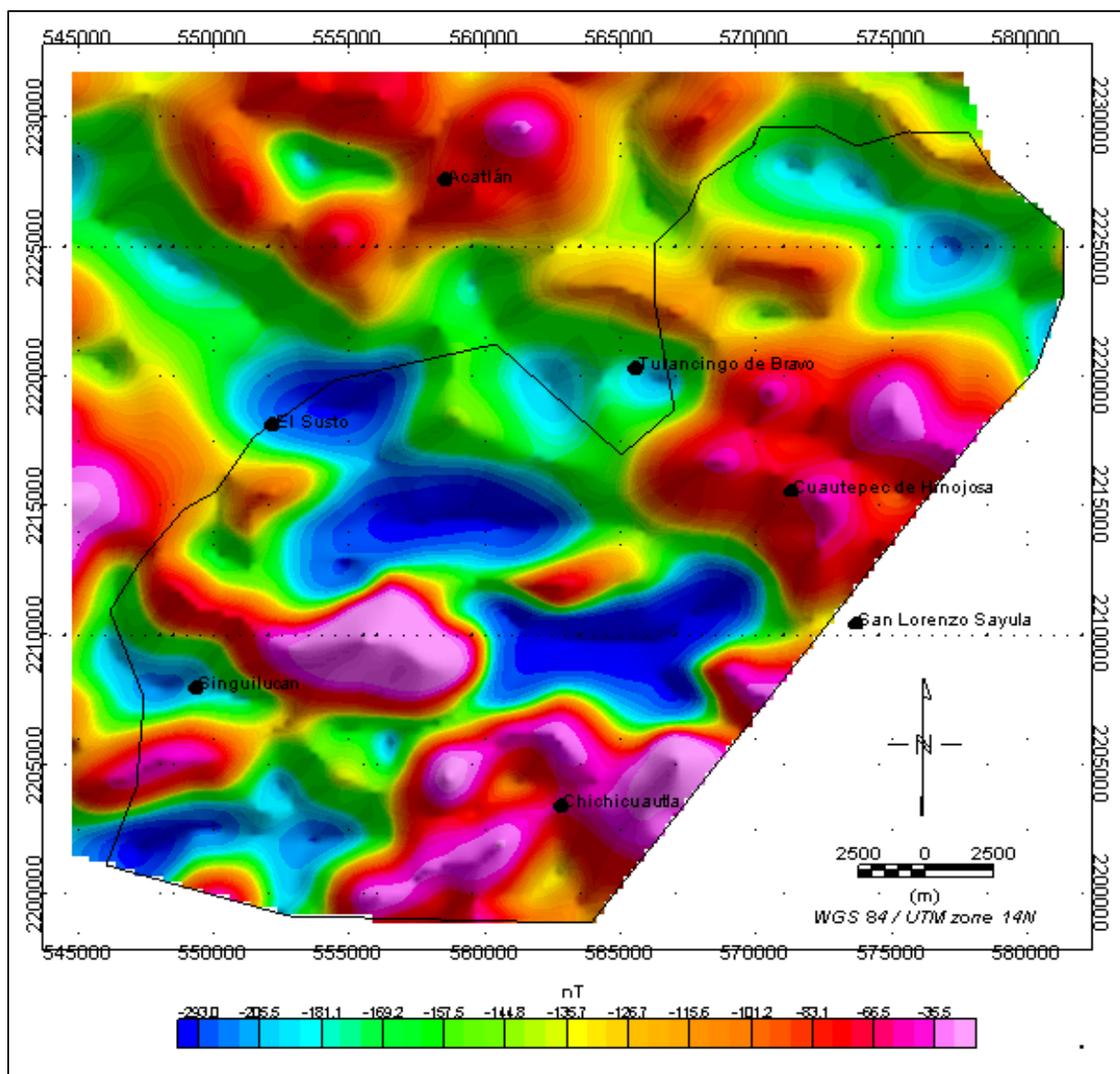


Figura 33. Mapa de Campo Magnético Residual (CMR).

La escala de colores que corresponde a las anomalías positivas oscila de 83.1 a 35.5 nT (colores cálidos en tonos rojos a rosados).

b) Campo Magnético Residual Reducido al Polo (CMRP)

Al CMR se le aplicó el filtro de RP, en el cual se puede observar que las anomalías tuvieron cambios en amplitud, forma y ubicación. Por ejemplo, en el caso del bajo magnético es notable el cambio de tamaño con respecto a la figura 33, asimismo presenta una mejor definición.

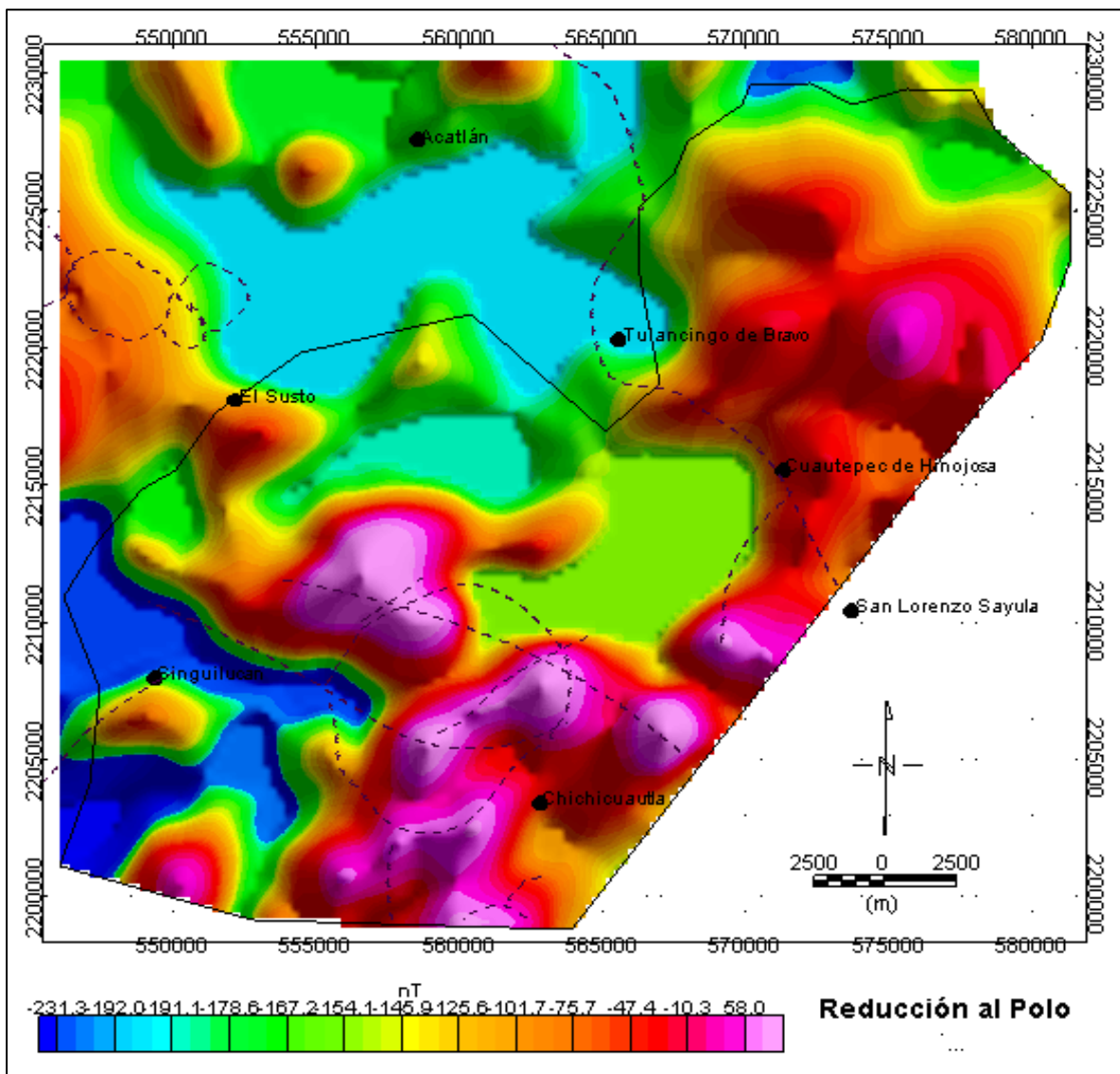


Figura 34. Mapa de Reducción al Polo.

En la figura 34 el CMRP muestra que los valores correspondientes a las anomalías positivas (tonos cálidos de color rojo-naranja a rosado) aumentan, incluyendo un rango de valores desde las -47.5 a las 58 nT.

c) Primera Derivada Vertical (1DV)

La información que representa el filtrado de datos de 1DV corresponde a la forma e intensidad de la respuesta magnética de los cuerpos-fuentes someros. En el mapa de la figura 35, y los valores positivos y/o negativos se encuentran sobre sus respectivas anomalías asociadas a contactos geológicos, fallas y/o fracturas.

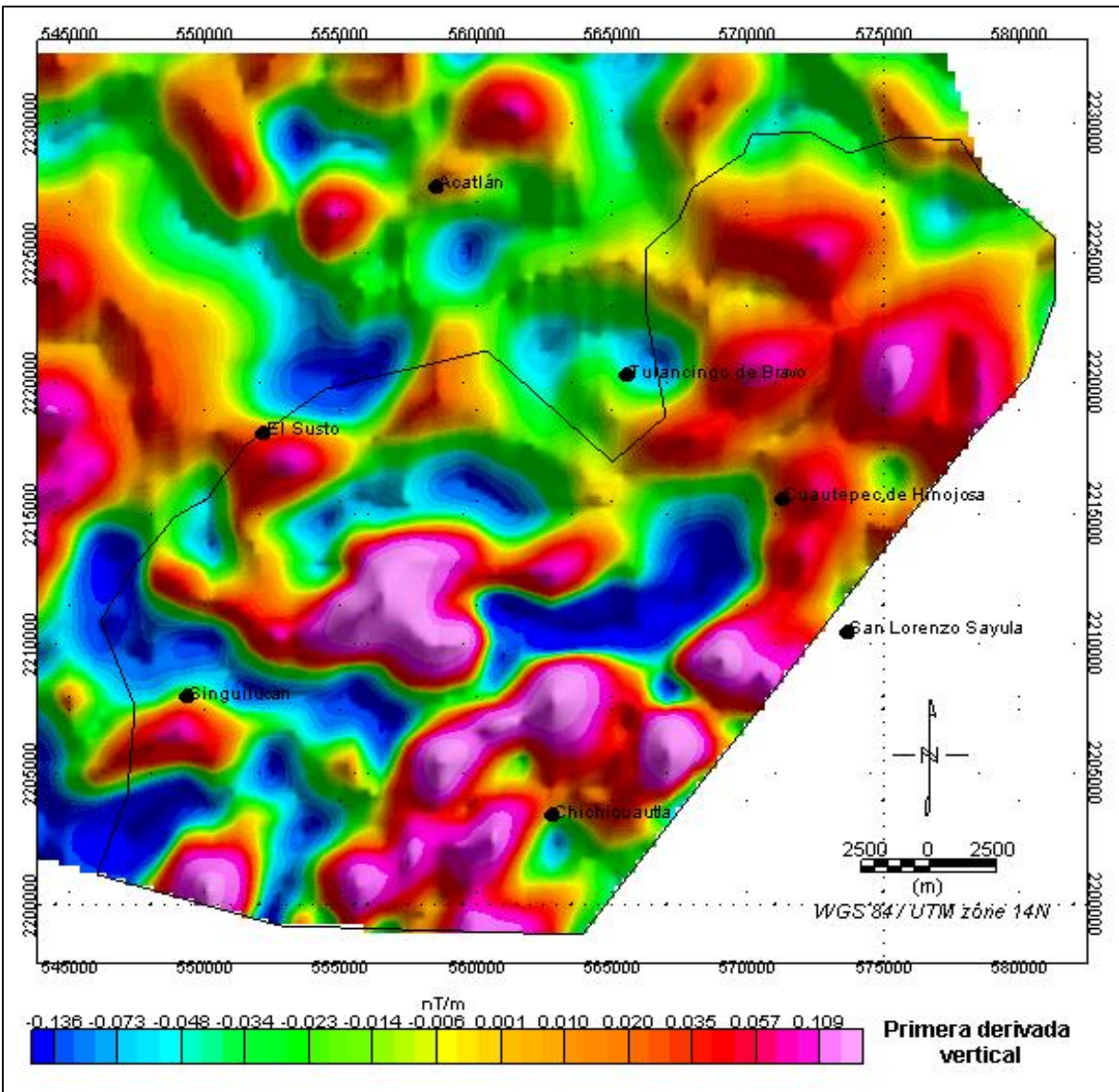


Figura 35. Mapa de Primera Derivada Vertical.

Con la 1DV el cuerpo causante de las anomalías está bordeada por el color amarillo-naranja (figura 35). Se puede observar que las anomalías en el sur son mucho más definidas por lo que pueden tratarse de cuerpos más cercanos a la superficie.

d) Derivadas Fraccionales (DF)

Las DF permiten multiplicar el nivel de realce de la derivada vertical original disminuyendo el ruido de la imagen.

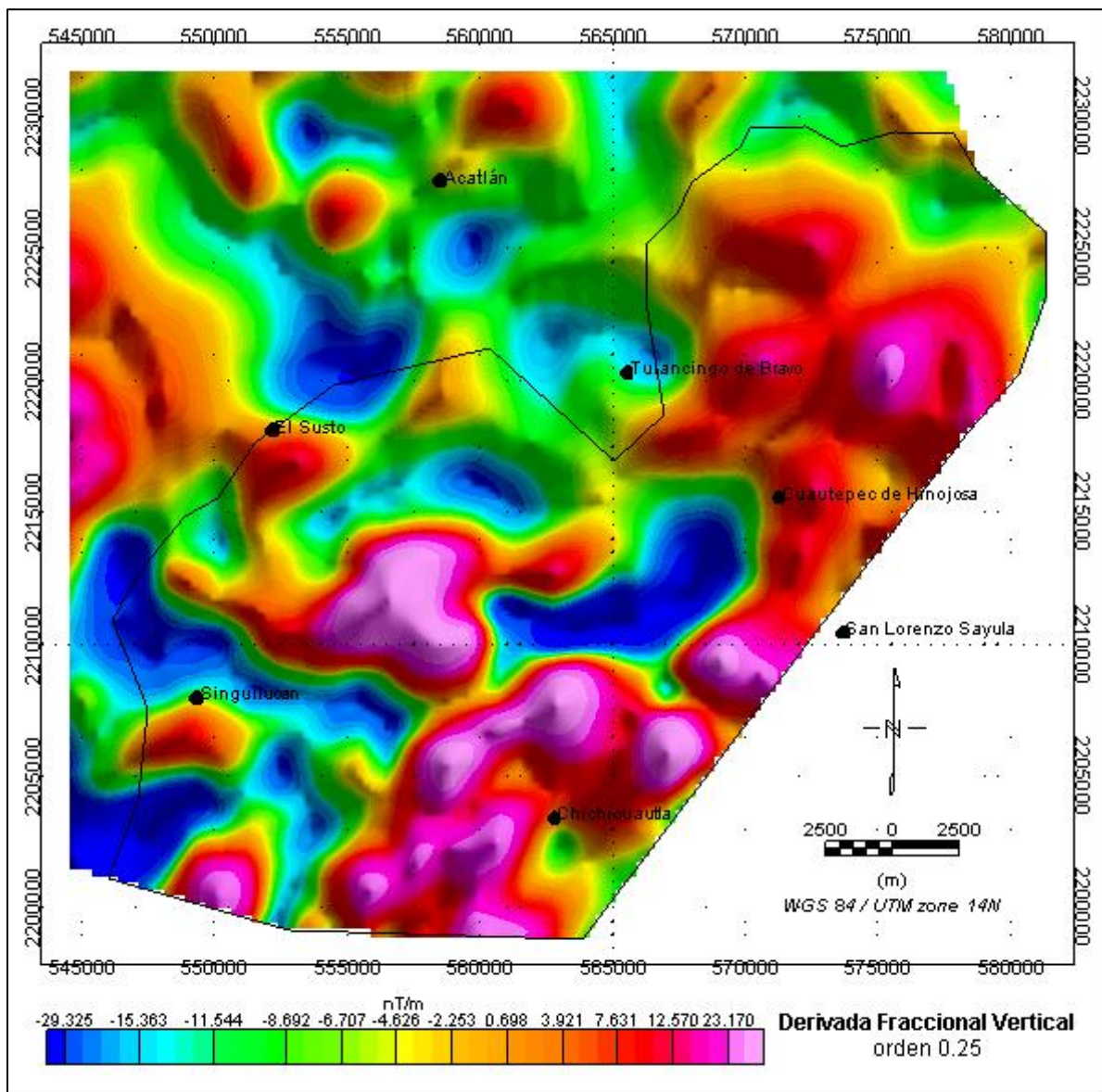


Figura 36. Mapa de derivada fraccional de orden 0.25.

En el mapa (figura 36) se observa que el nivel de ruido disminuyó considerablemente. Y a pesar de que el cambio fue en apariencia y definición, también se confirman el número de anomalías. La cantidad de altos magnéticos es el mismo mostrado con el primer filtro de realce (RP), pero ahora se definen con mayor resolución la forma de los cuerpos.

Es importante mencionar que el grado de detalle de las derivadas fraccionales es mayor conforme esta se acerque a la unidad. Por ejemplo, la información del mapa de la figura 36 presenta mayor definición. En la derivada de 0.25 la amplitud del bajo magnético era menor que en la derivada de orden 0.75 y al mismo tiempo no se mostraba unificada, sin embargo, en la figura 36 observamos que se trata de una serie de cuerpos asociados.

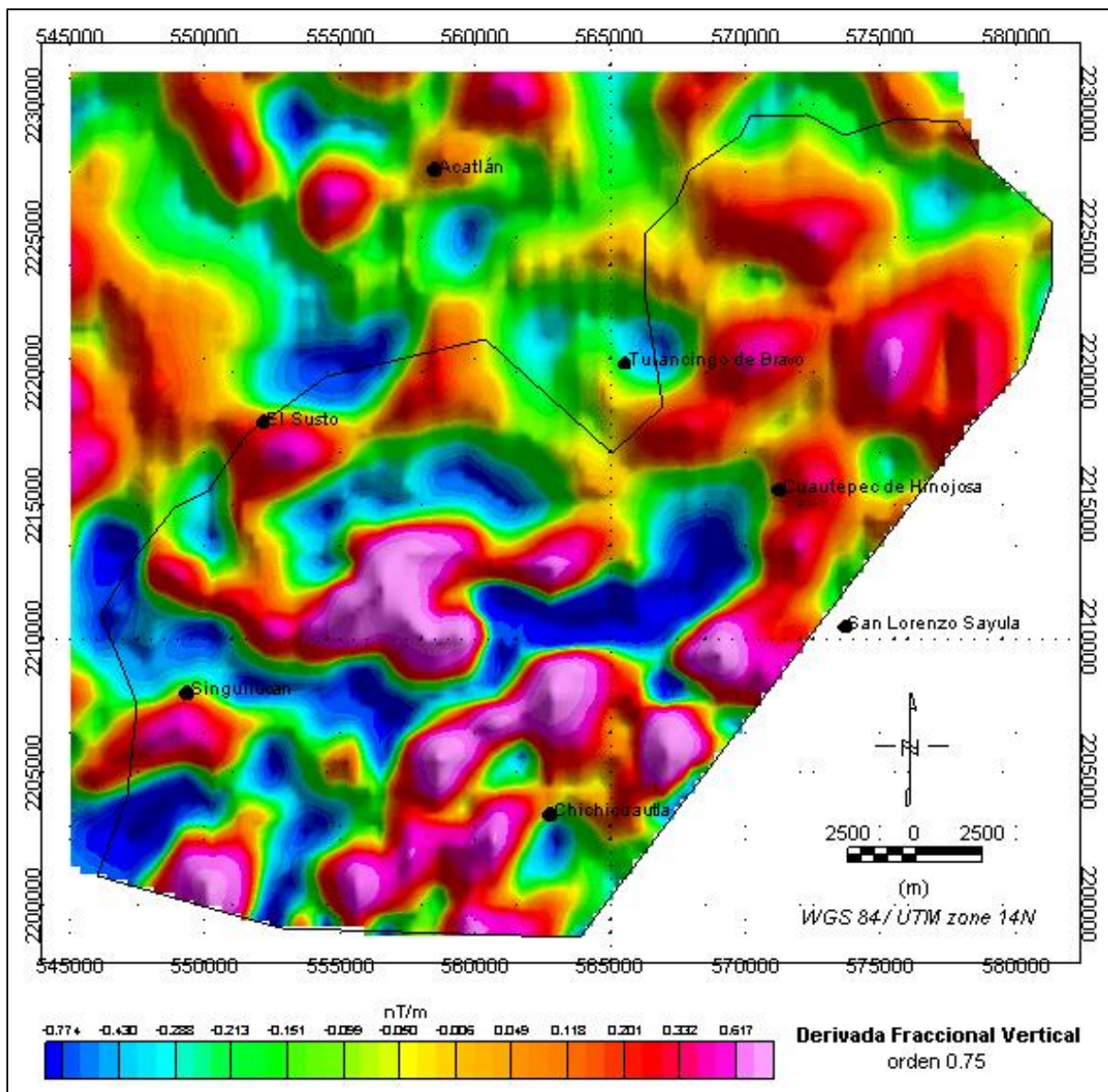


Figura 37. Mapa de derivada fraccional de orden 0.75.

Las anomalías en este mapa (figura 37) tienen un mejor balance entre el realce de la señal y el ruido. El grado de detalle en cuanto a delimitación de formas y tamaños de los cuerpos anómalos es mucho mejor que con la derivada fraccional de orden menor.

e) Señal Analítica (SA)

Este filtro obtiene el valor absoluto de la señal magnética, permitiendo así definir los bordes de las estructuras geológicas que causan las anomalías magnéticas.

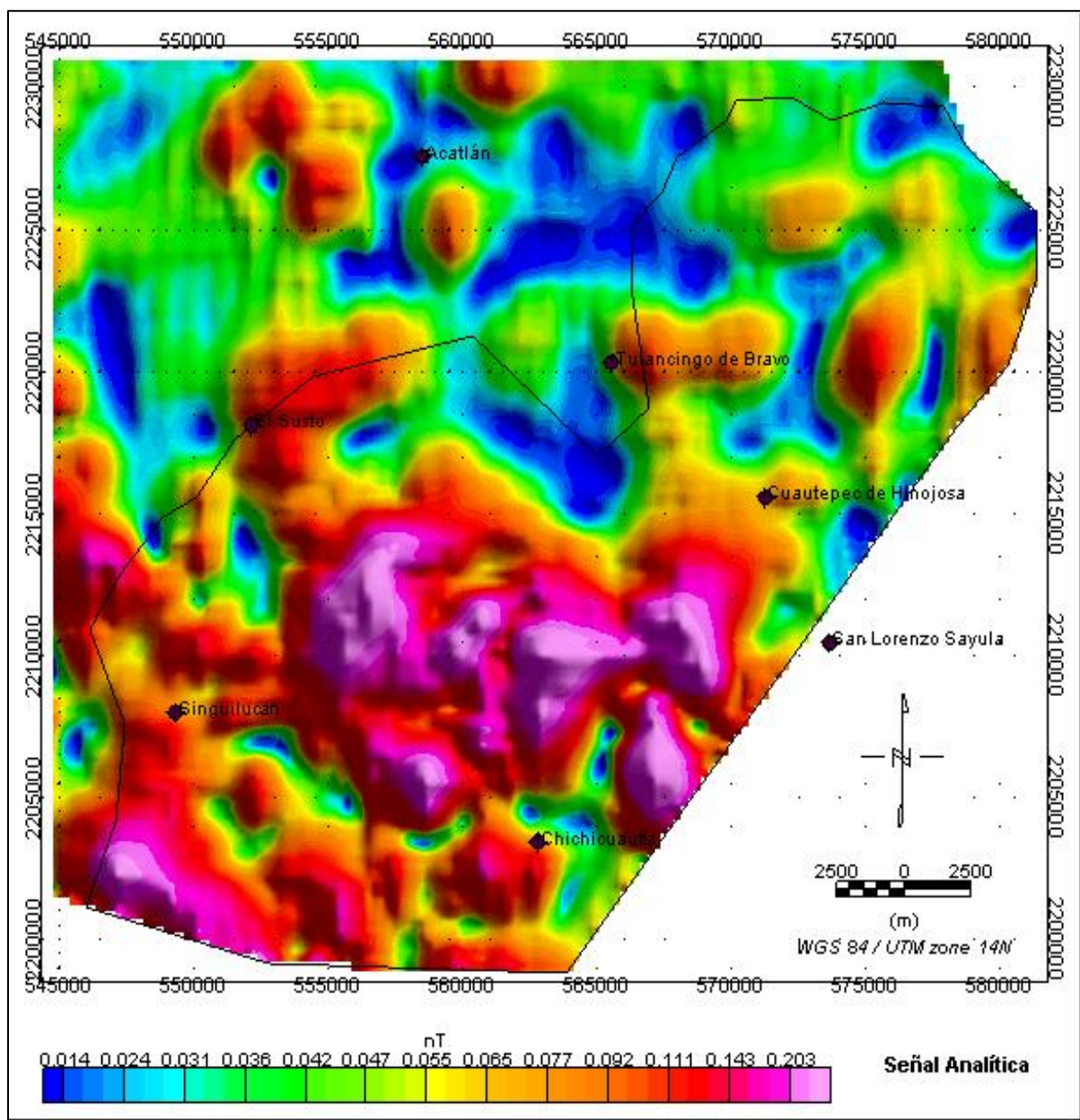


Figura 38. Mapa de Señal Analítica.

En la figura 38, la amplitud de las anomalías positivas se unificó de tal forma que las anomalías principales se representan como una sola, definiendo los límites de los cuerpos que están generando las respuestas magnéticas.

En la zona centro-SW del área de estudio (figura 38) se observa que las anomalías están unidas variando de los 8 a los 10 km de longitud y posiblemente la causa de dicha homogeneidad sea la relación de la misma fuente generadora. Está delimitada al norte por bajos magnéticos con rumbos NW-SE preferentemente.

La dirección se ve distorsionada de modo que se observa un acomodo concéntrico de los altos magnéticos, sin embargo, en las anomalías aisladas al sur se aprecia una tendencia hacia el NW. Se relacionan a estructuras locales como el lineamiento Amolucan y posibles fallas profundas vinculadas a la actividad volcánica de la zona. Por otro lado, la dimensión de la anomalía principal se asocia a las cámaras magmáticas de los aparatos volcánicos del área: la caldera de Chichicuautila, los domos y conos cineríticos al norte y ubicados en el radio de dicha estructura caldérica.

f) Ángulo TILT (AT)

El AT es aplicado para identificar contactos geológicos. Está relacionado con los valores de derivadas verticales y horizontales que representan en esta técnica un valor angular. Los contactos litológicos en este caso se localizan en el valor cero.

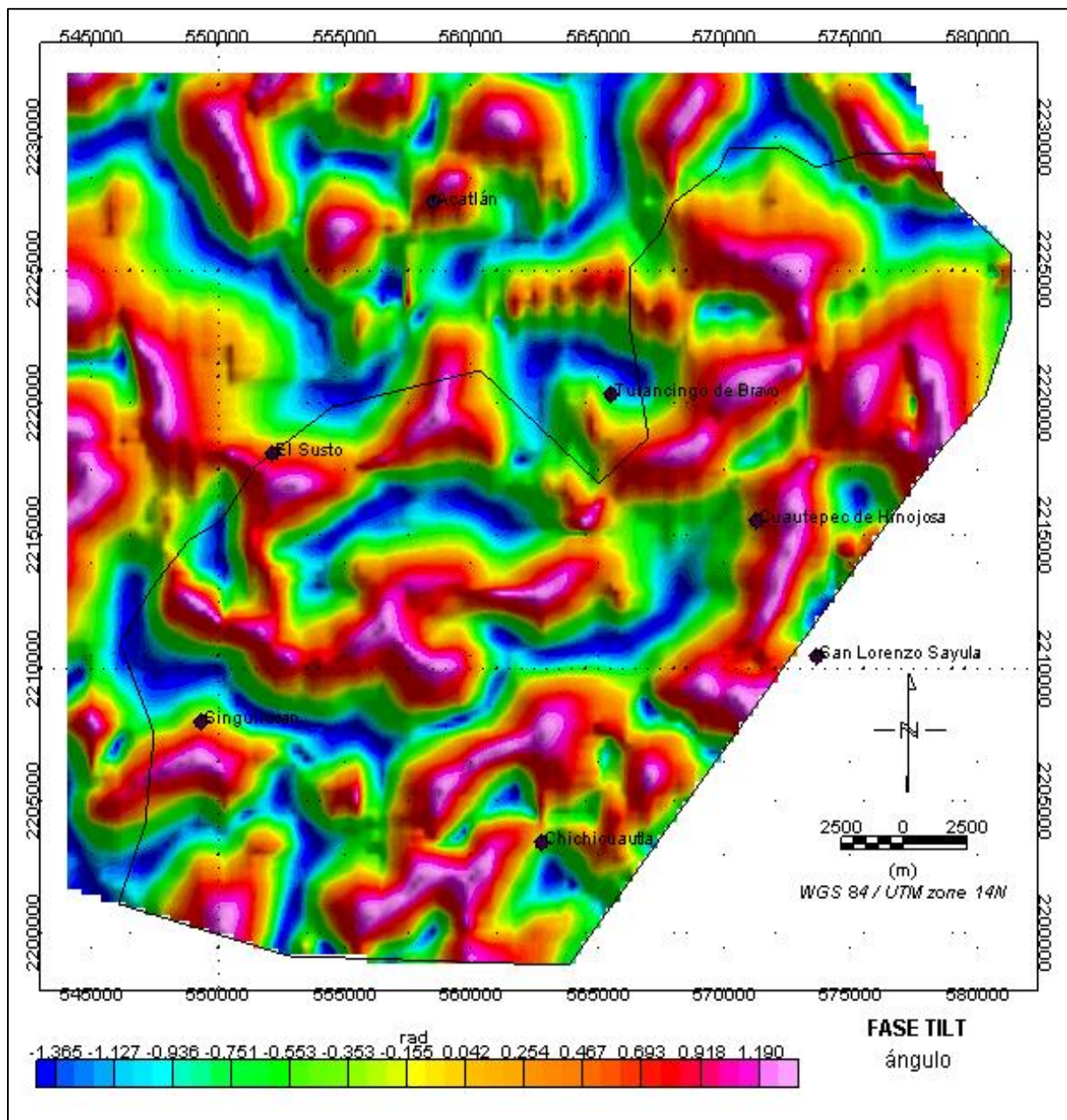


Figura 39. Mapa de ángulo TILT.

En la figura 39 el ángulo cero corresponde al color amarillo-dorado (0 a 0.042 rad), el cual indica los posibles contactos geológicos. A diferencia del resto de los filtros, este maneja radianes como unidad de medida e indica el ángulo de fase entre el dominio del tiempo y el dominio de las frecuencias determinando los contactos de las estructuras geológicas.

Cada uno de estos mapas magnéticos representan la variación del efecto de realce o procesamiento de anomalías con las que se puede conocer con cuál de estas es más fácil identificar características dependiendo del nivel de ruido y del grado de definición obtenido.

5.2. INTERPRETACIÓN Y RESULTADOS

La interpretación geofísica brinda respuestas a las anomalías obtenidas durante la prospección y exploración magnética, para esto se consideran dos etapas: interpretación cualitativa e interpretación cuantitativa.

La interpretación cualitativa dependerá de la asociación de las anomalías magnéticas con la información geológica de la zona de estudio, ya que en ella se define la totalidad de los cuerpos anómalos, su orientación, forma, y con ellos poder realizar modelos geológicos conceptuales para su comprensión, como perfiles, mapas o cartas que permitan visualizar su distribución, longitud y asociación litológica.

Por otro lado, también se cuenta con la interpretación cuantitativa, que consiste en aplicar técnicas y/o herramientas matemáticas con las que se pueda saber más sobre los cuerpos anómalos, un ejemplo es el cálculo de profundidades, volúmenes, contrastes y extensión de las fuentes generadoras de las anomalías. La interpretación debe de traducir o permitir comprender de manera congruente la respuesta geofísica.

Los mapas magnéticos obtenidos; Reducción al Polo, Derivadas Verticales, Derivadas Fraccionales, Señal Analítica y Fase TILT, se implementaron para localizar anomalías magnéticas asociadas a las fuentes de calor, zonas de debilidad como lo son las fallas o lineamientos que tenga favorabilidad geotérmica ya que representan el principal control de transporte de calor.

En este contexto, la coherente correspondencia de las anomalías magnéticas se distingue de manera general por tener una respuesta de menor intensidad en zona de valles, la cual se compone por depósitos aluviales que tienden a ser comúnmente bajos magnéticos respecto a los altos magnéticos del resto del área de estudio asociados a rocas volcánicas básicas-intermedias como basaltos y andesitas o los elementos estructurales de gran profundidad que llegan a causar contrastes en los datos magnéticos.

5.2.1. Lineamientos Magnéticos.

De manera general un lineamiento es un rasgo o característica física que revela la tendencia, dirección y forma de las anomalías geofísicas en la superficie de la tierra y que se reconocen por ser lineales o semi-lineales.

Para el trazo de los lineamientos se utilizó la información obtenida de FT y 1DV, esto debido a que las formas y direcciones de los altos y bajos magnéticos son más reconocibles que con cualquier otro filtro.

A partir de las anomalías identificadas, los lineamientos reconocidos en la figura 40 presentan orientaciones preferenciales NE-SW, o por lo menos aquellos que delimitan los altos magnéticos más notorios, mientras que los bajos magnéticos están representados por anomalías en dirección contraria.

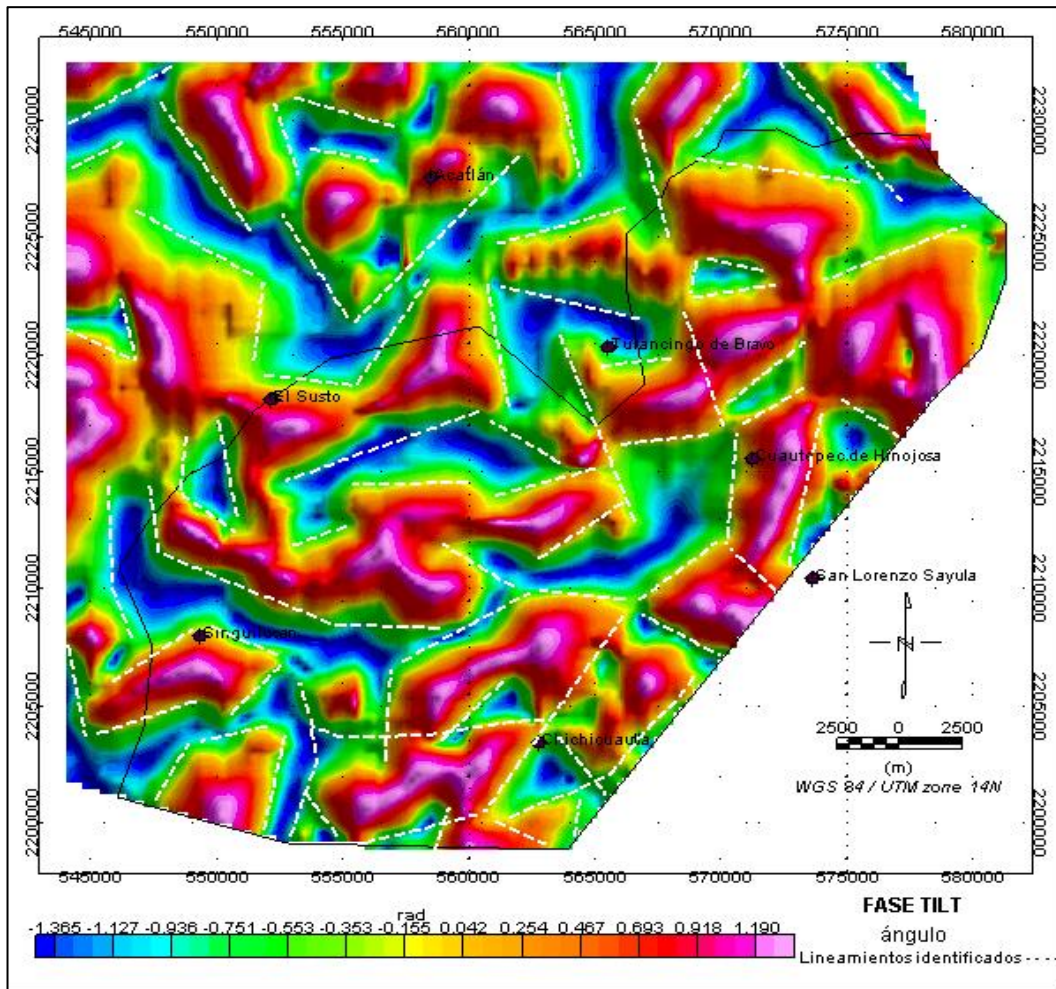


Figura 40. Lineamientos identificados en el mapa de Fase TILT (FT).

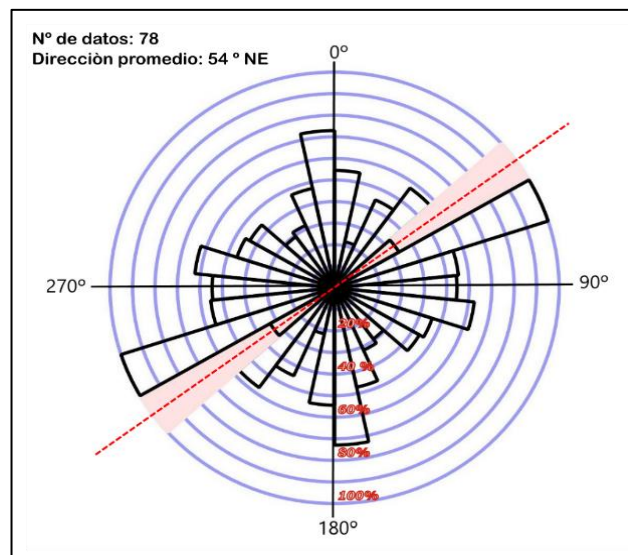


Figura 41. Orientación preferencial de los lineamientos identificados con FT por medio de una roseta de direcciones, señalando la tendencia principal en color rosa.

De acuerdo con el mapa (figura 40) y la roseta de direcciones (figura 41), los lineamientos están orientados preferencialmente al NE-SW.

Los lineamientos previamente identificados coinciden con algunas de las estructuras geológicas que afloran en la zona de estudio. Sin embargo, el resto de los lineamientos hallados a partir del ángulo TILT indican la existencia de más de 2 lineamientos cercanos o relacionados a la génesis de los conos cineríticos de la zona y que pueden tratarse de fracturas al no aflorar en superficie o que se encuentran cubiertos por material piroclástico o aluvial.

El filtro de fase de ángulo TILT se implementó para definir planos de debilidad o bordes con base en el principio de inclinación o ángulo entre contactos estructurales, pueden estar asociados a contactos litológicos, fallas y/o fracturas, a través de distintas características magnéticas, que se ubican en el valor cero del TILT. Los lineamientos son dependientes de la dirección de magnetización, mientras que la amplitud de la señal TILT es independiente ya que solo requiere de la intensidad de magnetización y del rumbo de las estructuras geológicas para la definición de los contactos.

Si se observa en el mapa geológico del área de estudio (figura 29) la orientación de los componentes estructurales más sobresalientes son predominantemente NW-SE.

Sin embargo, el resto de ellos tienen una dirección casi perpendicular a dichas estructuras hacia el NE-SW. Esta orientación predomina en fallas aisladas de las mismas unidades litológicas. Cabe mencionar que la configuración de las anomalías magnéticas es similar con la orientación de los afloramientos litológicos.

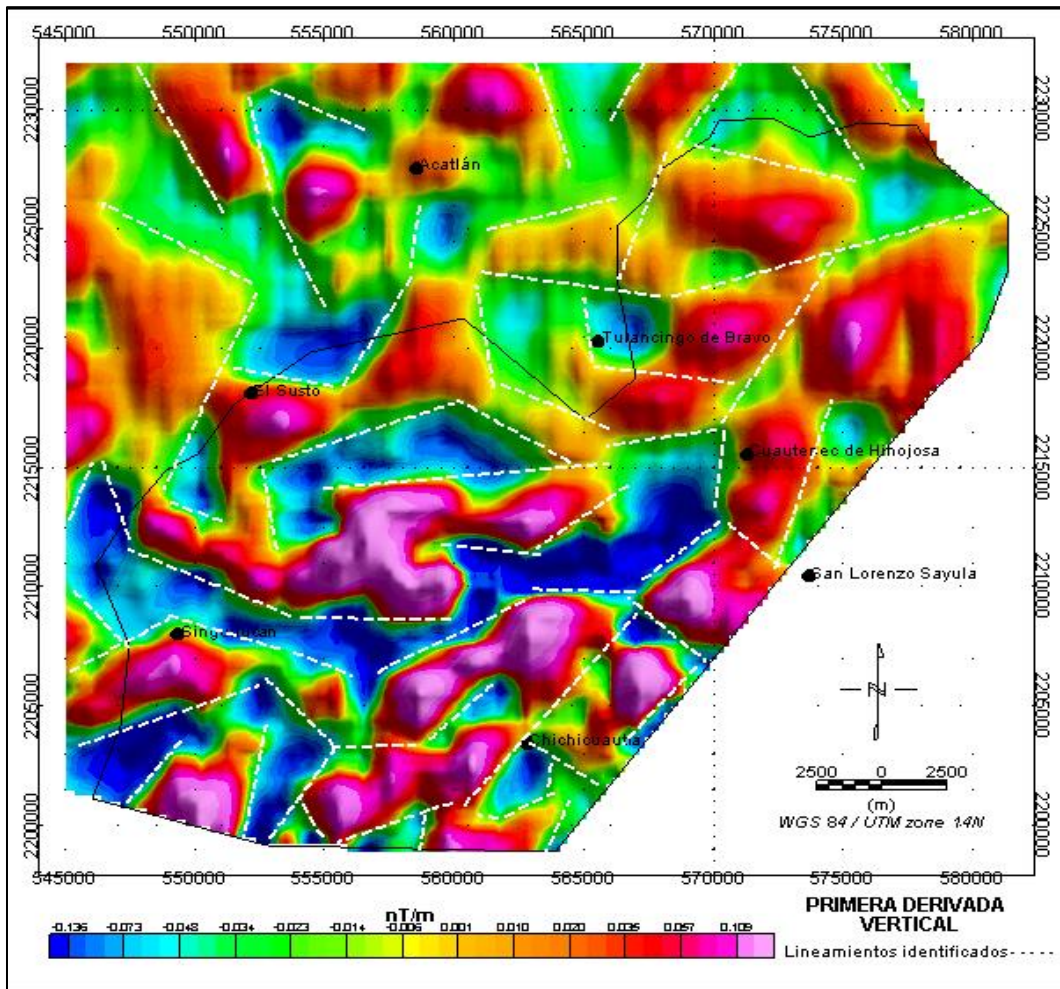


Figura 42. Lineamientos identificados en el mapa de Primera Derivada Vertical (1DV).

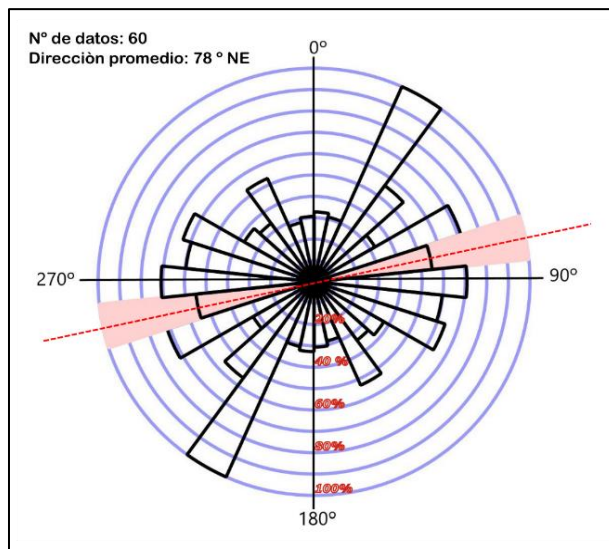


Figura 43. Orientación preferencial por medio de una roseta de direcciones de los lineamientos identificados en la primera derivada.

De acuerdo con el mapa (figura 42) y la roseta de direcciones (figura 43), los lineamientos están orientados preferencialmente al NEE-SWW.

Esta dirección preferencial coincide con la posición de los domos La Paila Seca, La Paila de Agua y el Tío Lolo, además de presentar similitud con el rumbo general de los lineamientos principales dentro del área de la caldera de Chichicuautila. Como se ha mencionado, el método de procesamiento de derivadas verticales permite resaltar aquellos cuerpos que se localizan más cerca de la superficie y definir sus posibles bordes, por lo que los lineamientos obtenidos representan las direcciones de dichos cuerpos a través de los contactos y de posibles fracturas someras.

Los lineamientos se definieron con base en las tendencias direccionales de los bordes o contactos de las anomalías, se trazaron y se exportaron en formato vectorial para utilizar las polilíneas como vectores, y con la herramienta *Line Direction Histogram* del software QGIS (3.8.1 Zanzivar) se obtuvo el diagrama de roseta mostrado anteriormente.

5.2.2. Dominios Aero-Magnéticos (DAM)

Para poder caracterizar la geología del subsuelo y hallar la relación de los lineamientos con el componente estructural de la zona de estudio, también se determinaron DAM en la reducción al polo. Esto consiste en conocer la relación y alcance de las aparentes zonas con propiedades magnéticas similares definiendo los DAM en el área de estudio.

Los DAM son los valores de contraste del campo magnético, es decir, las regiones delimitadas por los altos y bajos magnéticos con notables cambios de frecuencia entre las anomalías que definen dichas regiones, ya sean continuas o aisladas (Sánchez-Bravo, 2014).

5.2.2.1. Dominios Aero-Magnéticos Superficiales

Para este caso de estudio se utilizaron los filtros de realce de la señal geofísica obtenidos previamente. Se tomaron en cuenta los rasgos de separación de los dominios obtenidos a través de la señal analítica, TILT y la primera derivada vertical de orden fraccional 0.75 de la reducción al polo. Al utilizar estos algoritmos se visualizan con mayor detalle la señal de cada anomalía obteniendo con mayor certeza la totalidad de dichos dominios, en este caso se definieron un total de 4 dominios primarios y 5 secundarios o subdominios.

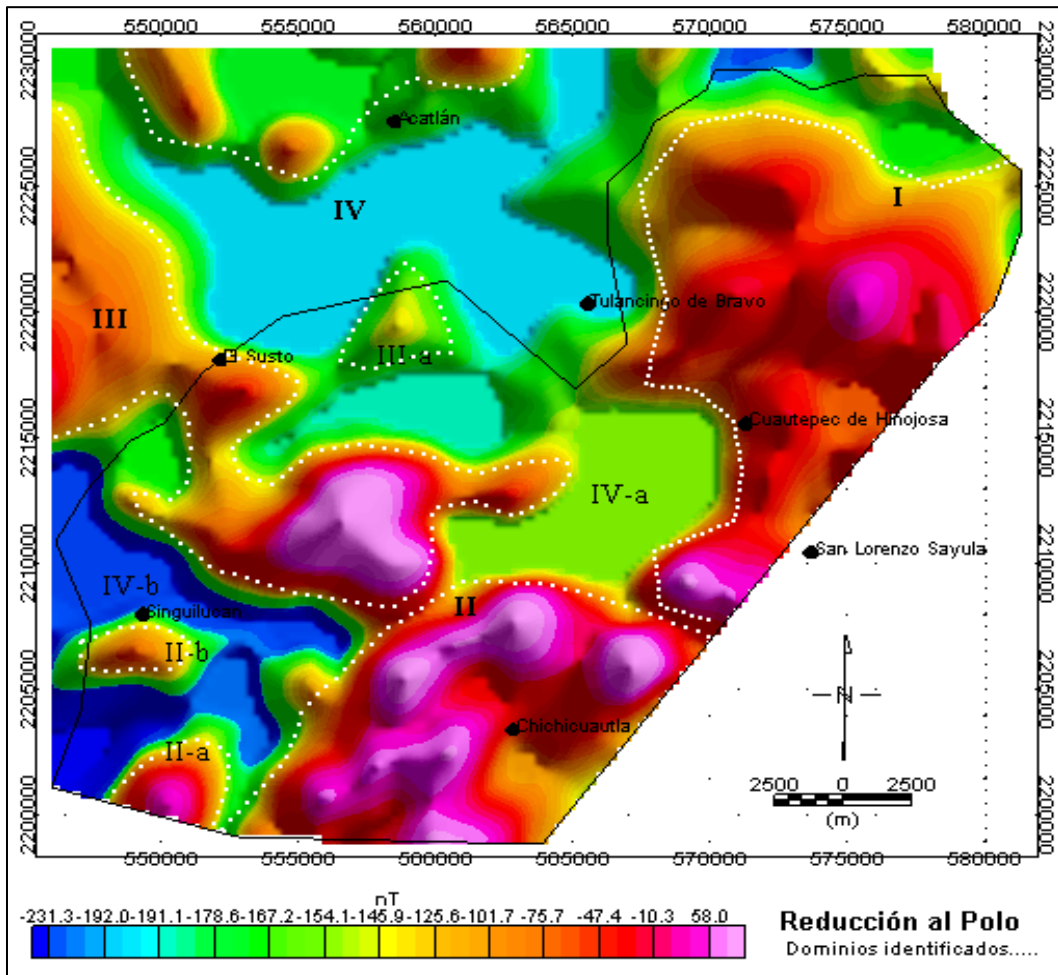


Figura 44. Dominios Aero-magnéticos identificados en el mapa de Reducción al Polo.

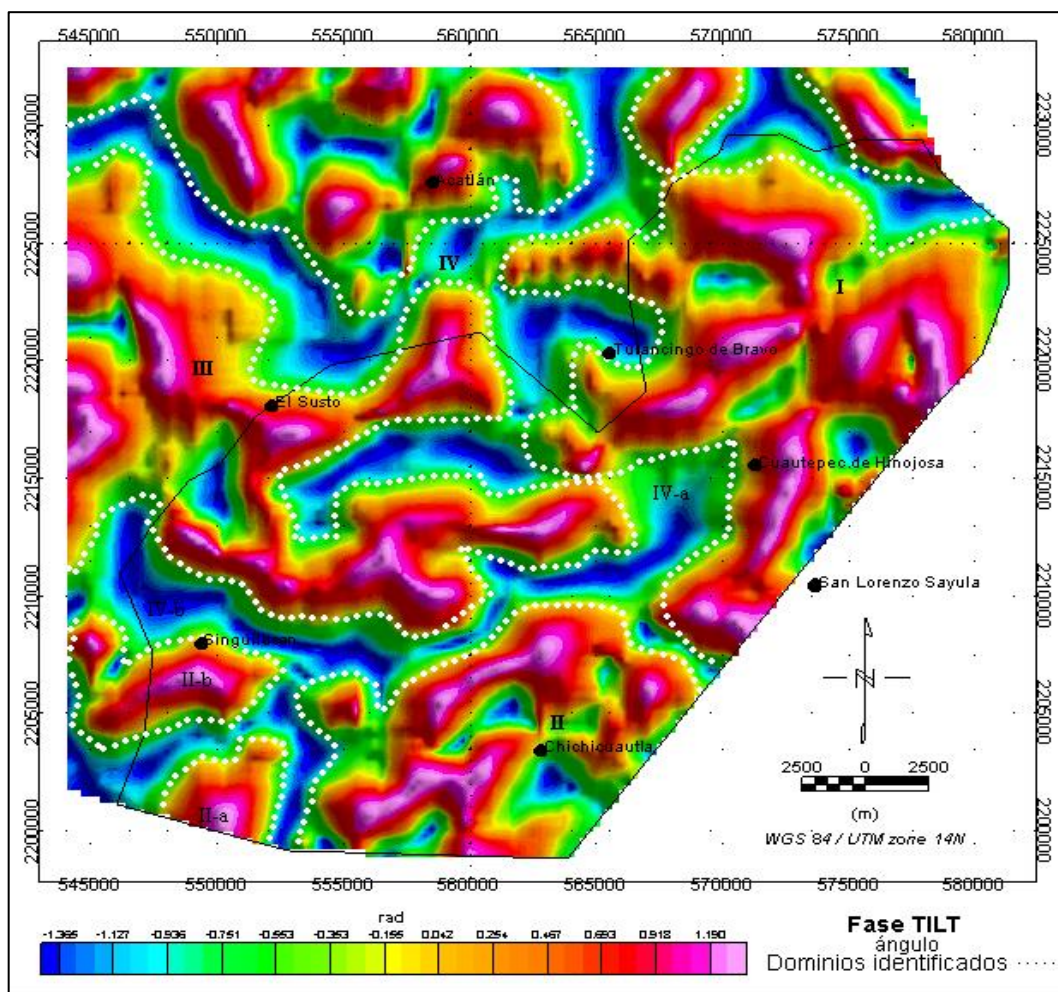


Figura 45. Dominios identificados en el mapa de Fase TILT.

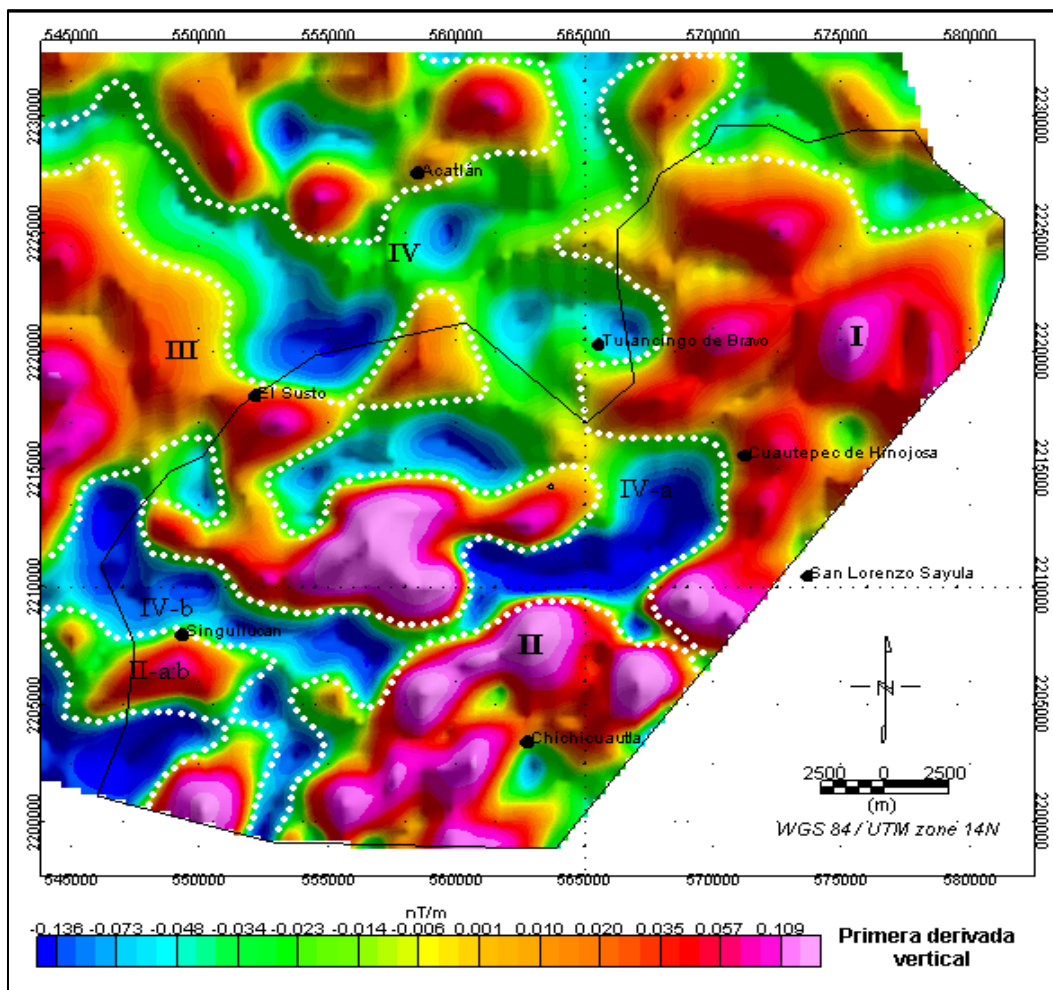


Figura 46. Dominios identificados en el mapa de primera derivada vertical.

Con los mapas de las figuras 44, 45 y 46 se identificaron los principales dominios magnéticos de los cuales los DAM I, II y III corresponden a los altos magnéticos asociados a aquellos materiales de gran susceptibilidad magnética, coincidiendo con los afloramientos litológicos volcánicos.

Por otro lado, el DAM IV delimita una zona de mínimos magnéticos, que corresponden a los rellenos aluviales de limos, arenas y gravas; generalmente encontrados en la zona de valle.

Los DAM primarios o principales están conectados; esta continuidad está determinada por las unidades litológicas relacionadas, para este caso son los derrames de Basalto-Andesita, Toba basáltica y Piroclasto los que coinciden superficialmente y se representan como una sola fuente anómala que puede resultar de la unión de varias anomalías. Cabe mencionar que existen estructuras aisladas (subdominios), asociados esencialmente a coluvión, arenas, gravas y material lacustre que pueden relacionarse a las pequeñas depresiones de la topografía y en donde los procesos erosivos convierten cualquier tipo de roca en sedimentos de relleno.

5.2.3. Continuaciones Ascendentes y Dominios Aero-Magnéticos (DAM) Regionales Profundos del CMRP

Para la delimitación final de los DAM identificados en el área de estudio se aplicaron continuaciones ascendentes a 100 m, 500 m y 1 km al CMRP. Este procedimiento permite conocer la continuidad de las áreas con respuestas magnéticas similares, interpretando que si la anomalía se aleja de la fuente causal permite identificar si se trata de uno o varios subdominios magnéticos al ver si esta permanece homogénea o se divide. En las siguientes figuras (47, 48 y 49) se muestran los diferentes DAM identificados a través de las continuaciones ascendentes mencionadas.

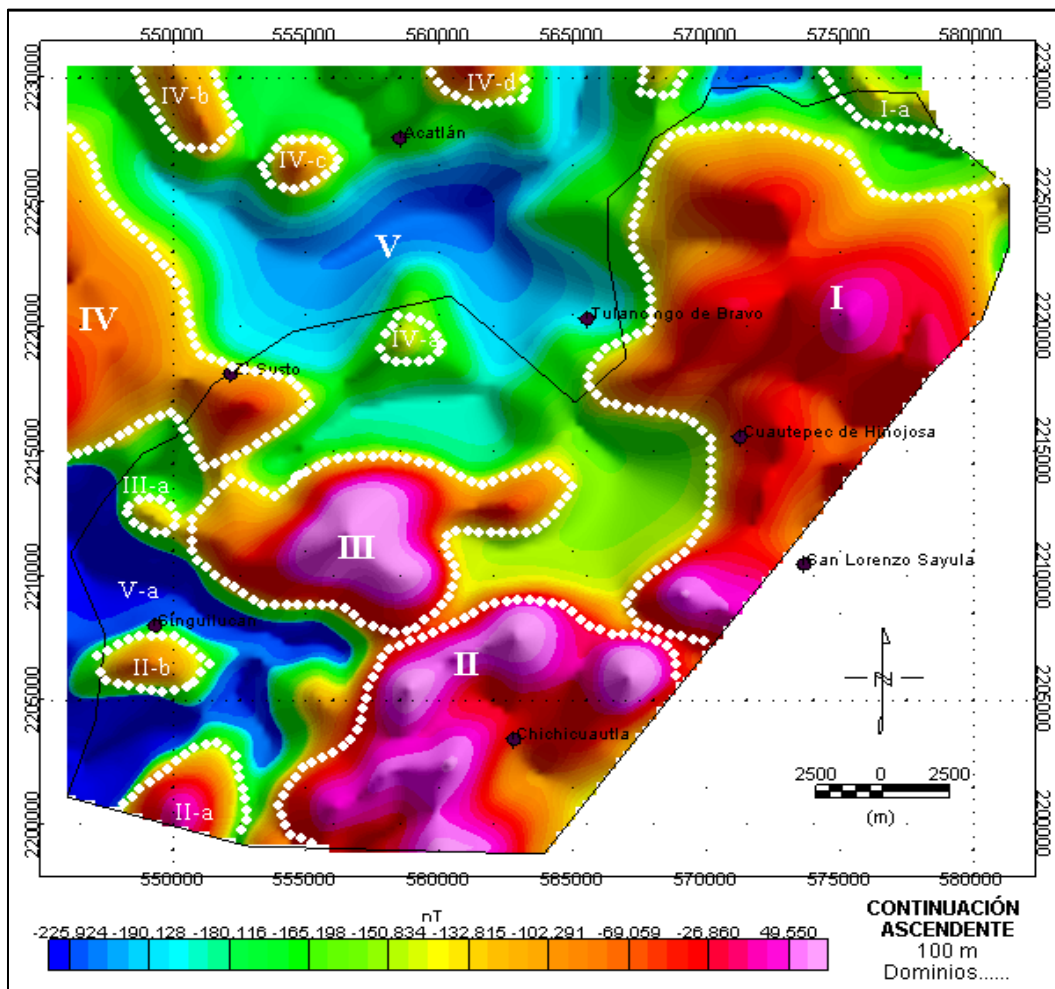


Figura 47. Dominios identificados en el mapa aeromagnético por continuación ascendente a 100 m.

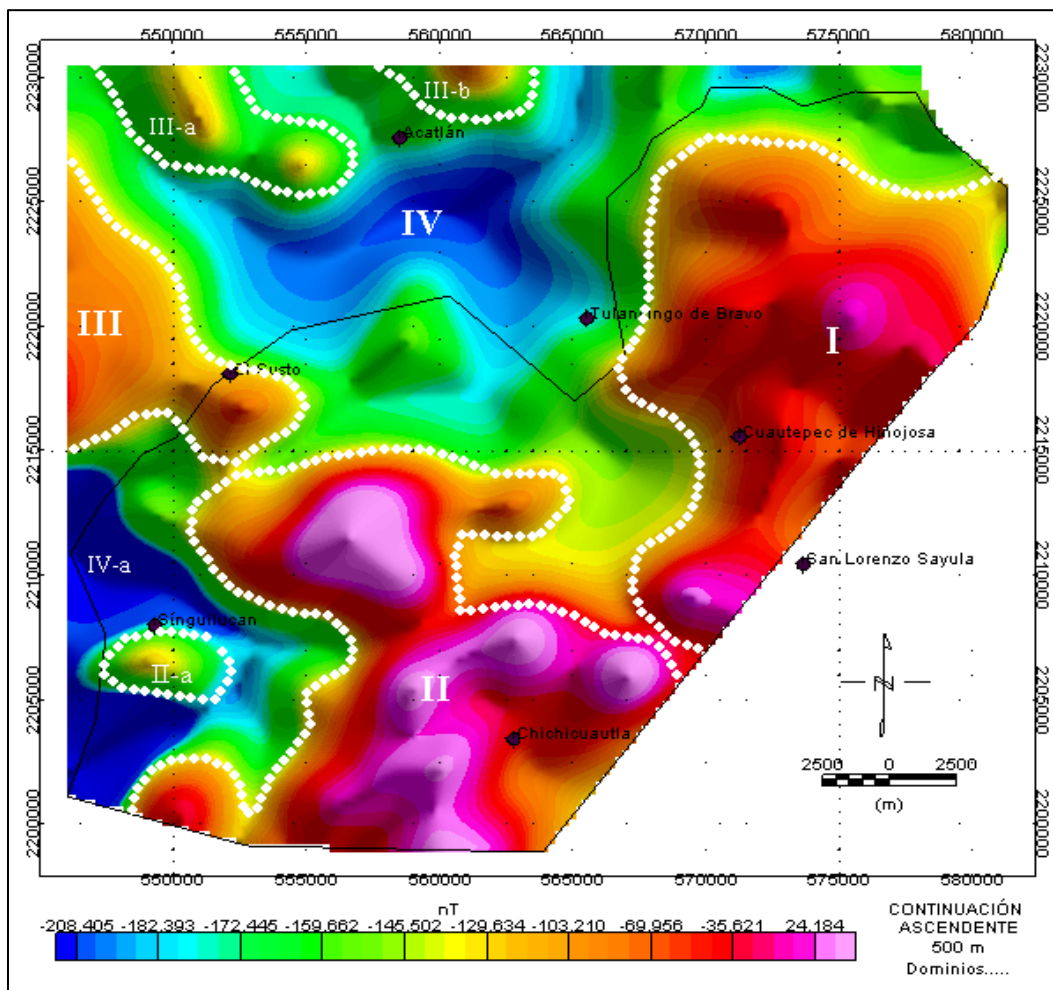


Figura 48. Dominios identificados en el mapa aero-magnético por continuación ascendente a 500 m.

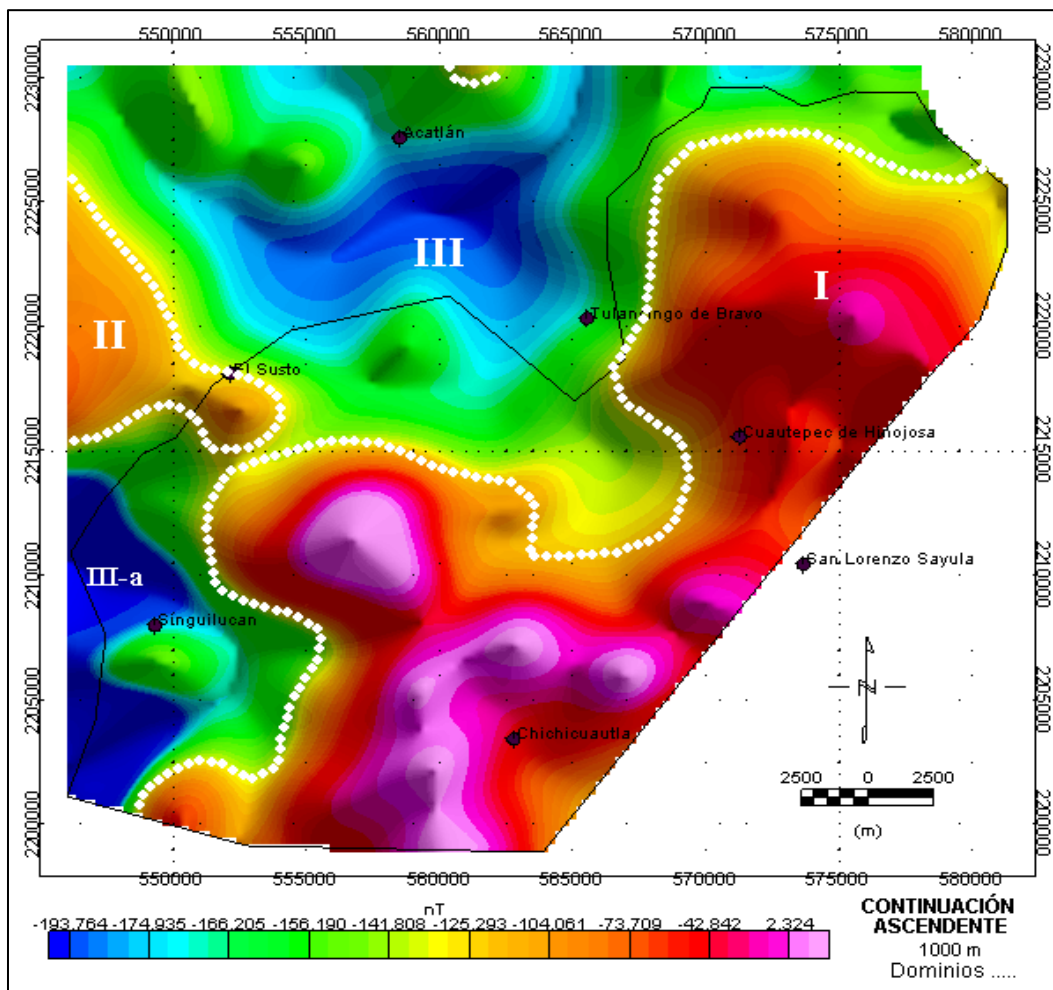


Figura 49. Dominios identificados en el mapa aero-magnético por continuación ascendente a 1000.

A partir de las continuaciones ascendentes (figuras 47, 48, 49) se identificaron 3 DAM principales de los cuales I y II se definen por un grupo de altos magnéticos asociados a rocas volcánicas que delimitan al DAM III una zona de bajos magnéticos correspondiente a los bajos topográficos del área de estudio cubiertos por aluvión y depósitos de arena y Piroclasto. Nótese cómo a partir de las continuaciones se resaltan los rasgos generales de cada dominio, unificándose las pequeñas anomalías.

5.2.4. Continuaciones Ascendentes y Dominios Aero-Magnéticos (DAM) Regionales-Profundos de la Señal Analítica (SA).

De igual manera, con el mapa de SA se generaron las continuaciones ascendentes a profundidades de 100 m, 500 m y 1 km (figuras 50, 51, 52 respectivamente).

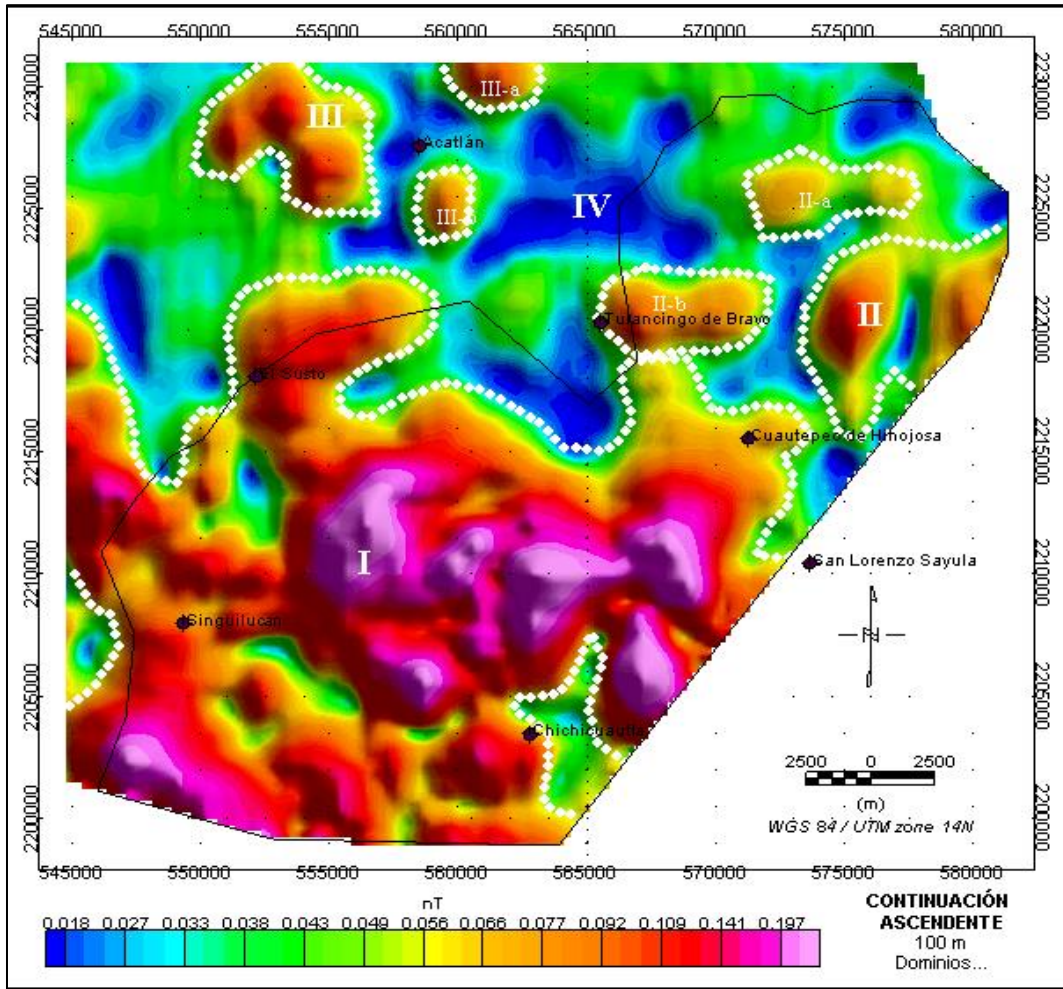


Figura 50. DAM en anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente a 100 m.

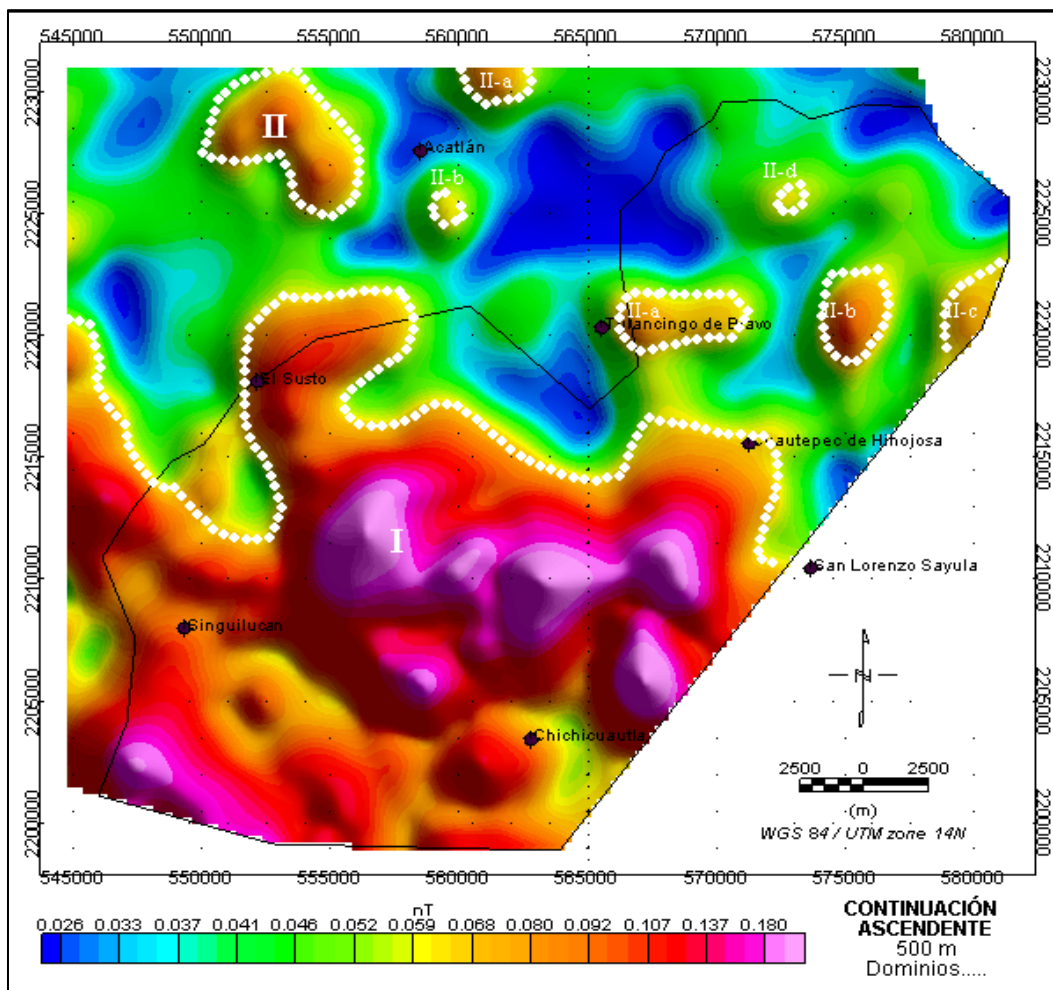


Figura 51, DAM anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente a 500 m.

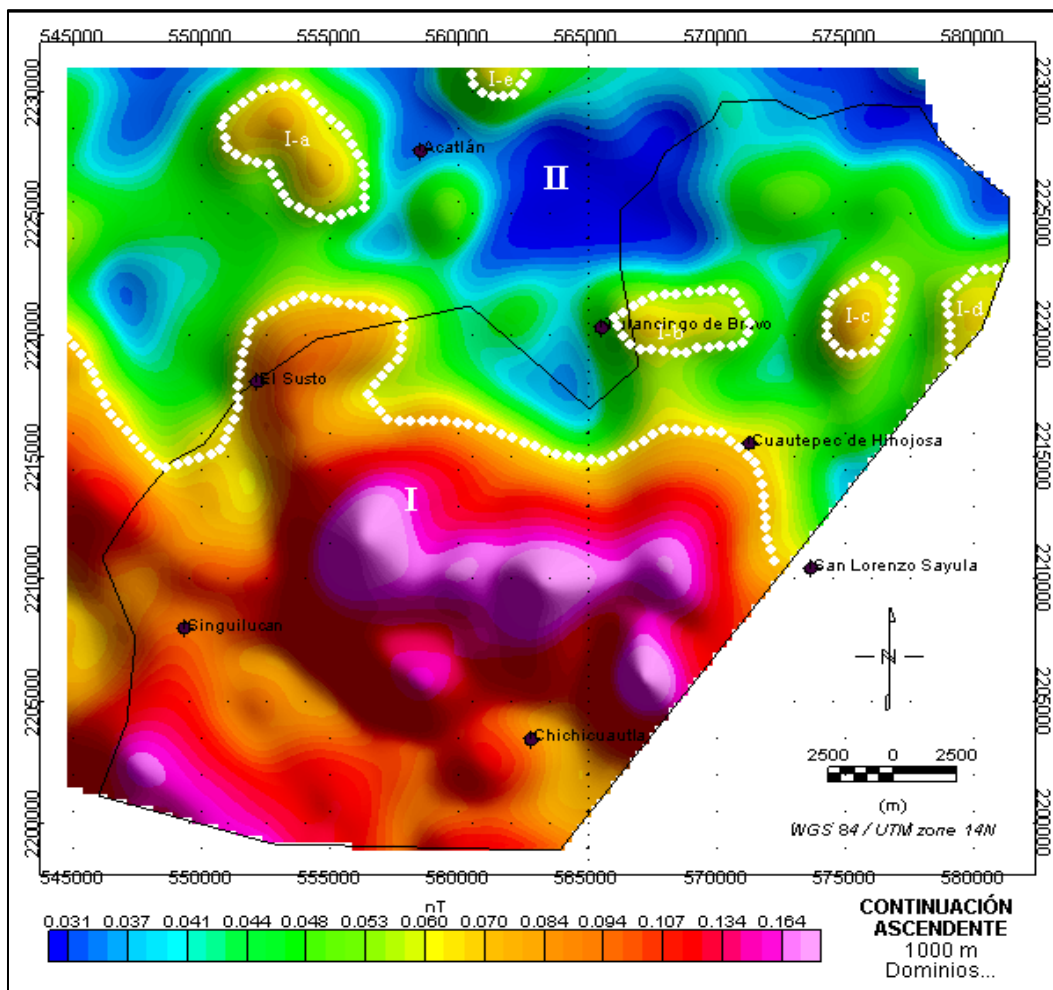


Figura 52. DAM identificados en las anomalías de Señal Analítica a través de continuación ascendente de 1 km.

En las figuras 53 y 54 se esquematiza la variación de amplitud del campo magnético con base en los cambios aplicados al utilizar continuaciones ascendentes.

Como se ha mencionado con anterioridad, la zona de estudio presenta una configuración geológica dominada por unidades volcánicas de composición basáltica-andesítica cubiertas por depósitos aluviales del cuaternario. Dichas rocas conforman una serie de sierras bajas y valles que a su vez integran la geomorfología volcánica del área, la cual aflora en la zona sur en donde destaca la caldera de Chichicauhtla y los conos cineríticos circundantes (conocidos como “Las Pailas”), las cuales están estrechamente ligadas a las respuestas magnéticas identificadas durante el proceso de realce de las anomalías, además de ser las fuentes principales de cada una de estas señales.

En la figura 53 se muestra la sobreposición de las continuaciones ascendentes de los resultados del filtro RP. Se trata de las medidas del CMRP a diferentes alturas (100, 500 y 1000 m) en donde se puede observar

que a mayor altura se someta el levantamiento, menor será la resolución y definición de los cuerpos anómalos, mientras que a menor altura existe una diferenciación notable de estos.

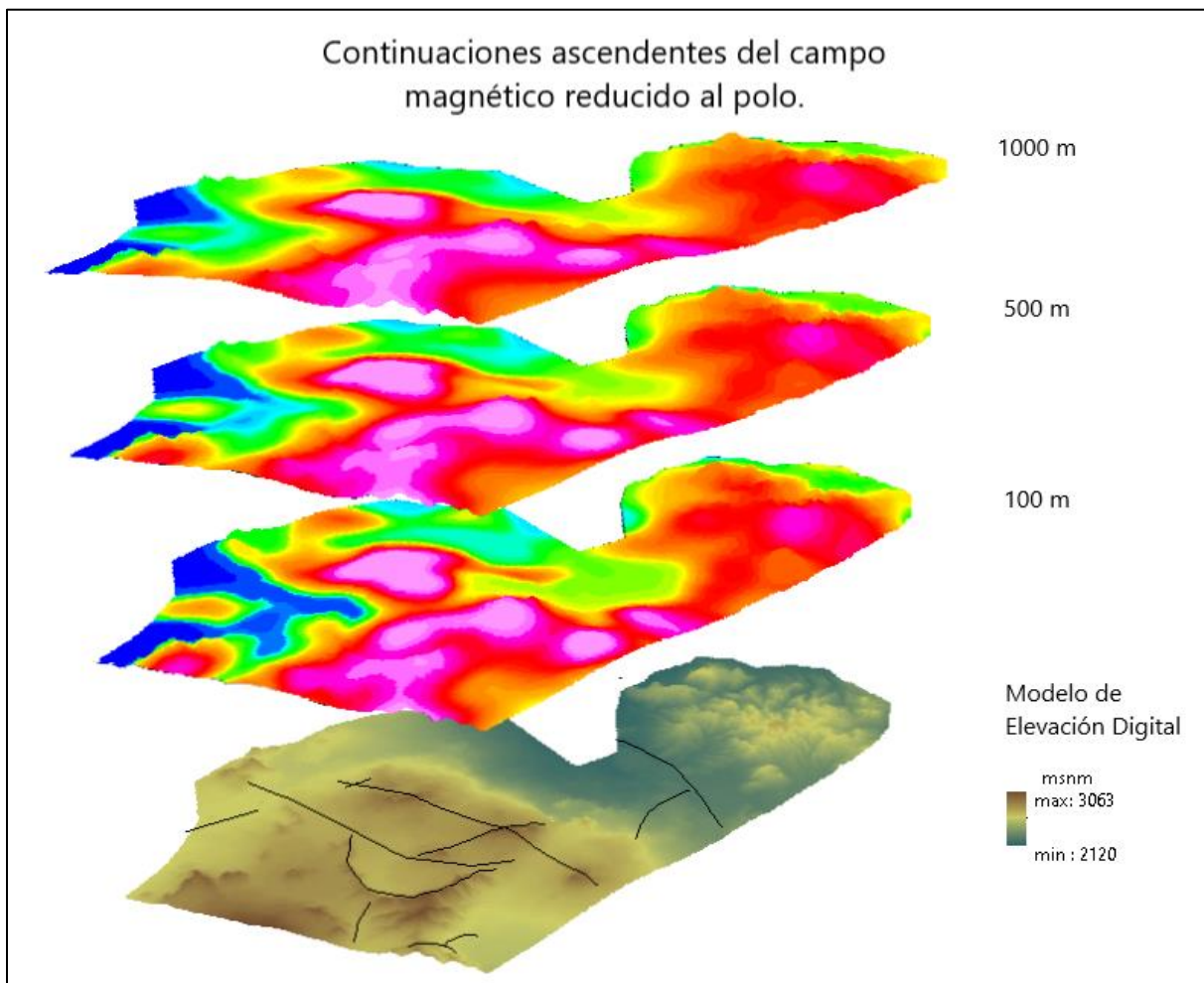


Figura 53. Modelo 3D donde se muestran los cambios en la amplitud y delimitación de los dominios a través de continuaciones ascendentes del CMRP.

Como podemos ver en la figura 53 se reconocen más de tres cuerpos cercanos a lo que es la estructura volcánica principal, la caldera Chichicuautila, nótese que únicamente son apreciables dichos cuerpos a partir de los 100 m de altura.

Del mismo modo se realizaron las continuaciones ascendentes del campo magnético de SA debido a la favorable definición de los bordes de las estructuras geológicas generadoras de las anomalías más cercanas a la caldera Chichicuautila.

En la figura 54 se observa la definición de cuerpos anómalos entre el lineamiento Los Volcanes y el límite sur de la caldera Chichicuautila asociados al origen de los domos concentrados en el interior de estos bordes estructurales, estos domos son: Tío Lolo, La Paila Seca y La Paila de Agua.

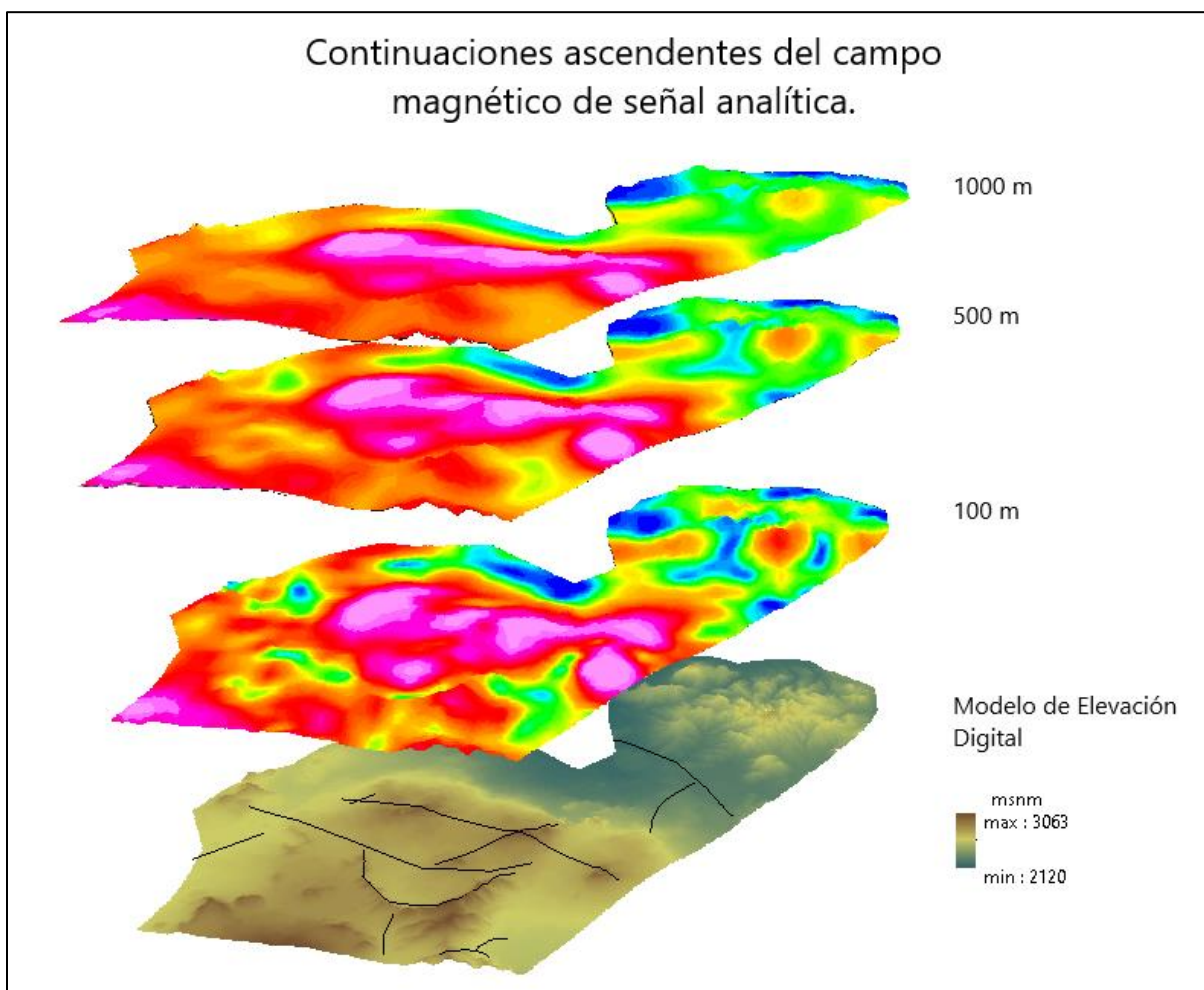


Figura 54. Modelo 3D donde se muestran los cambios en la amplitud y delimitación de los dominios a través de continuaciones ascendentes del campo de SA.

En esta figura se aprecia que la amplitud de los altos magnéticos es mayor a menor altura y su forma presenta una mejor definición, lo que permite reconocer más de un cuerpo anómalo asociado a las estructuras geológicas localizadas en esa área.

5.3. MODELOS MAGNÉTICOS

La modelación de los datos magnéticos a través del método de Inversión Magnética permitió elaborar dos modelos bidimensionales trazadas en la figura 55, utilizando los datos del CMRP. La figura 56 corresponde a la sección C-C' que corta la zona de estudio en dirección NE-SW. La figura 57 muestra la sección magnética del perfil D-D' que va del E al SW, atravesando casi perpendicularmente el área de trabajo; esto con la intención de tener un mayor alcance y cubrir una mayor área al momento de la interpretación.

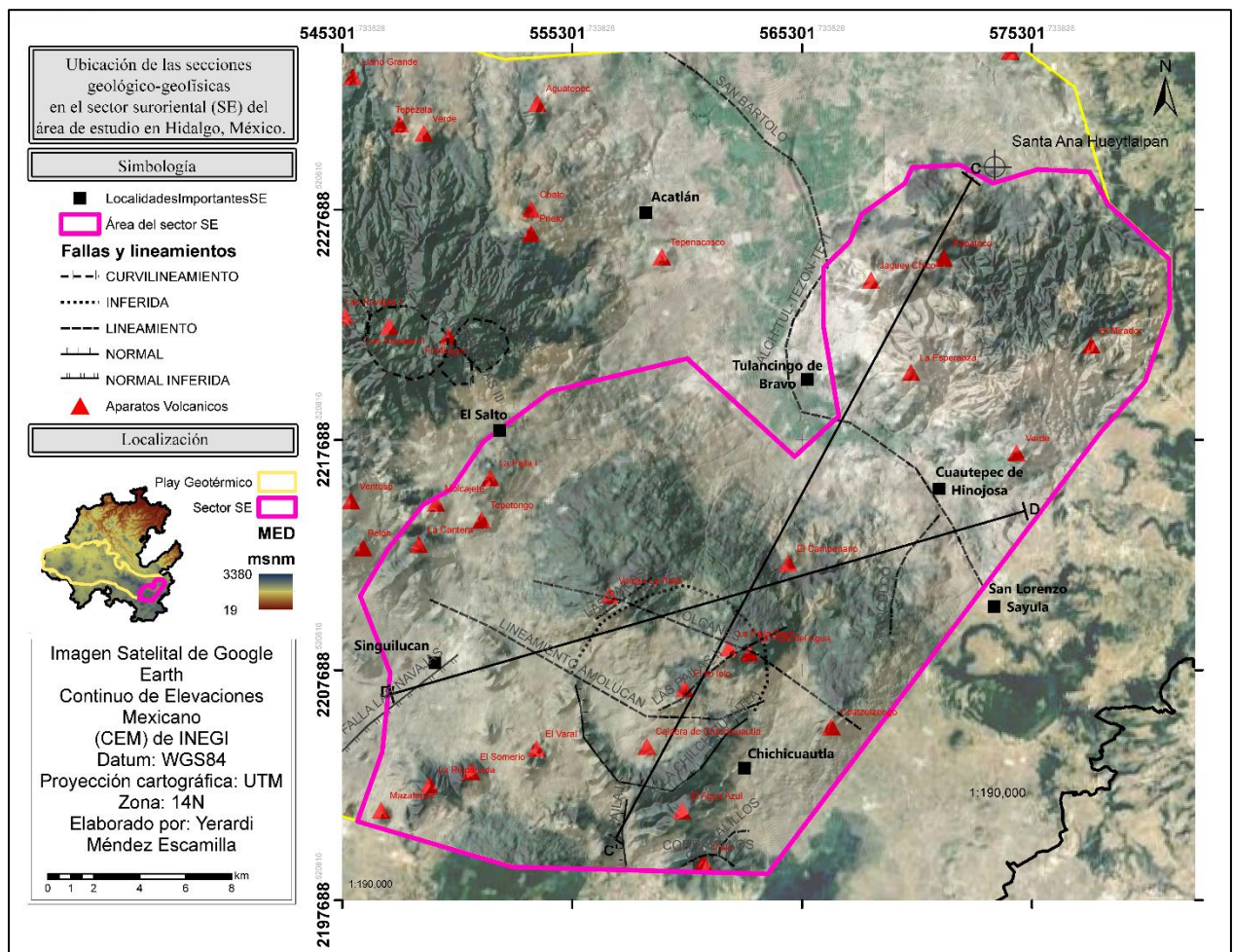


Figura 55. Localización de los perfiles geológico-geofísicos.

Para poder realizar dichos modelos se realizó la inversión de los datos magnéticos con el objeto de obtener el menor grado de error posible al momento de correlacionar estructuras y unidades litológicas con las respuestas magnéticas y presentar una interpretación lo más adecuada al modelo geológico conceptual. En la tabla 8 se presentan los valores de susceptibilidad de las rocas existentes en la zona de estudio. Cabe señalar que cada uno de estos valores se tomaron de los datos de las tablas 5, 6 y 7.

Tabla 8. Valores magnéticos y nombre de las rocas del área de estudio.

Rocas de la zona	Susceptibilidad $\times 10^{-6}(SI)$	Valores usados
Andesita	1 702 000	1.7
Basalto-Andesita	250 – 180 000 -1 702 000	0.18
Basalto- Piroclasto	630 - 130 000 / 250 -10 000	0.13
Dacita-Riolita	2000/ 250 - 38 000	0.038
Piroclasto-Arena	700-10 000	0.01
Calizas	33000 - 46000	-0.046
Granito	0 – 50 000	0.05

Además de la susceptibilidad, existen otros parámetros importantes para realizar correctamente la inversión magnética de datos, estos son: magnitud, inclinación y declinación del campo magnético terrestre. Dicha información es requerida debido a que se necesita para corregir la distorsión que el campo magnético tiene en las diferentes latitudes de la Tierra, mostrando una forma bidimensional del cuerpo que causa la anomalía magnética y para esto se necesita conocer las condiciones del campo magnético en el momento que se hizo el levantamiento (el año de vuelo fue en 1996). El campo magnético terrestre está en constante cambio y sus valores tienden a variar con base en la dinámica del planeta y estos valores pueden cambiar de un día a otro. Para complementar dichos parámetros se requirió la consulta de la calculadora en línea del campo magnético de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Tabla 9. Valores del campo magnético terrestre durante el año 1996 tomado de NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)

Parámetro	Valor
Magnitud (H)	40500 nT
Inclinación (F)	47.9950°
Declinación (FD)	4.5080°

A partir de la información del CMRP se elaboraron dos modelos. La figura 56 contiene la sección C-C' geológico-magnética modelada, mientras que la figura 57 muestra la sección D-D', siendo la primera la de mayor longitud.

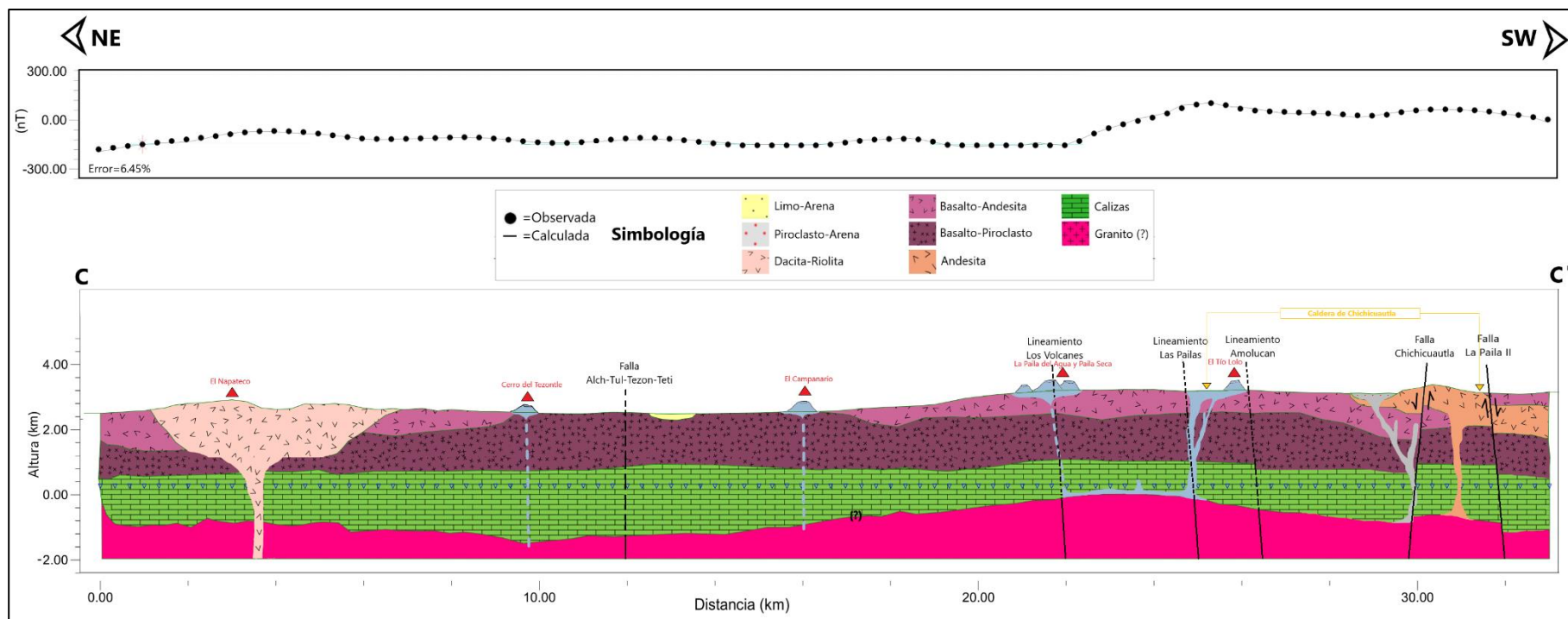
Se utilizaron la información de las secciones geológicas para la correcta interpretación del subsuelo, debido a que la geología es inferida y el análisis geofísico a partir de la susceptibilidad magnética proporciona mayor veracidad a la interpretación.

El ajuste de los valores consistió en modelar las unidades litológicas que se tienen identificadas en la zona. En los modelos se identificaron las mismas litologías, pero observadas en vistas longitudinales diferentes. Con respecto a las unidades litológicas más profundas, en ambas la primera unidad se infiere un basamento ígneo plutónico a una profundidad superior a los 2 km, el cual, puede tratarse de la unidad granítica identificada en los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 de la zona de Acoculco, localizada a 30 km al oriente del área de estudio teniendo una variación imperceptible en el modelo debido a la profundidad en que este se encuentra. La segunda capa corresponde a la secuencia sedimentaria cretácica que aflora al norte del estado de Hidalgo y al noreste del área de estudio. En ambos modelos las variaciones de mayor relevancia se reconocieron en las secuencias volcánicas cenozoicas, y se describen a continuación.

5.3.1. Sección C-C'

Este perfil se trazó con rumbo NE-SW, está referenciado hacia el poniente, es decir la vista de la sección va de oriente a poniente y tiene una longitud de 32.6 km y se obtuvo un error de 6.45%, el cual representa el ajuste de los datos observados o medidos con respecto a los calculados (a mayor ajuste el error disminuye). Las unidades litológicas más superficiales corresponden a una secuencia de rocas volcánicas del Terciario-Cuaternario: Basalto-Piroclasto depositado durante el Plioceno-Pleistoceno; lavas de Basalto-Andesita del Pleistoceno, y; material piroclástico del Cuaternario provenientes de episodios volcánicos monogenéticos que cubren parcialmente las rocas anteriores, de manera general se puede observar que la curva magnética no presenta grandes contrastes en los contactos litológicos, de hecho, los gradientes se denotan en los lineamientos asociados a fracturamiento y/o fallas.

Al NE en el cerro el Napateco se tienen reconocidos afloramientos aislados de Dacita-Riolita del Plioceno, se infiere su origen a una fase volcánica que generó gran volumen de lavas riolíticas y riodacíticas permitiendo la edificación de un domo (el mismo cerro). En esta parte de la sección se observan bajos magnéticos levemente destacados, pero, las sutiles variaciones magnéticas coinciden con la ubicación de pequeños conos cineríticos de edad reciente y del domo riolítico. Cercanos a los 10 km al sur del trazo de la sección C-C', la falla regional Alcholoaya-Tulancingo-Tezoncualpan-Las Tetillas provoca un contraste débilmente marcado a comparación de los lineamientos asociados a domos.



Al sur de la sección aflora la Andesita “Chichicuautila”, en los límites de esta unidad litológica la curva reconoce un ligero cambio denotando un alto magnético justo al sur del lineamiento “Los Volcanes”, lo que puede ser el límite norte de la caldera antes de su colapso, asociando también esta respuesta magnética al conducto volcánico, situando las lavas andesíticas a menos de 1km de profundidad, en superficie y en domos al poniente y sur de la caldera. Esto se observa con mayor claridad en la siguiente sección, en donde se interpreta la Andesita como una secuencia intermedia que aflora en superficie por medio de un conducto volcánico y de los diferentes rasgos estructurales (lineamientos, fallas y fracturas) que pudieron haber favorecido el emplazamiento de las lavas y lo que llevó a la formación de la caldera.

Con respecto a las fallas y lineamientos reconocidos en la zona de estudio, en la sección se relacionan congruentemente con gradientes magnéticos. El lineamiento Las Pailas II y Amolucan definen un alto magnético, asimismo, la falla normal “Chichicuautila” junto a la falla “La Paila II” señalan el acomodo de un bloque levantado (*horst*) destacado ligeramente en la curva magnética. Entre el lineamiento Amolucan y la falla normal “Chichicuautila” se reconoce morfológicamente la depresión que distingue a la caldera a través de un bajo magnético ocasionado por el evento de colapso que la formó. Cabe señalar que los contrastes magnéticos son más notables en estructuras como fallas y lineamientos que en los contactos litológicos, la tectónica extensiva del área de estudio es la principal causa de estas variaciones en el modelo bidimensional.

5.3.2. Sección D-D’

La sección D-D’ tiene una longitud de 28.7 km y una dirección casi E-W, inicia del oriente hacia el suroeste (E-SW), el error de ajuste de la sección fue de 7.43%. En su trayectoria se localiza un gradiente magnético en el lineamiento Acoculco, a pesar de que se trata de una proyección del área de afectación estructural de la caldera Acoculco esta se identifica en el modelo bidimensional, con este modelo se reconoce su influencia dentro de la zona de estudio. Siguiendo el trazo de la sección se encuentra una ligera disminución de la respuesta magnética justo después de un contraste asociado al lineamiento Amolucan, el cual se observa igual en la sección C-C’. Las unidades andesítico-basálticas son cubiertas en superficie por lavas riolíticas sincrónicas, que coronaron la zona provocando homogeneidad magnética. Pasando esta zona sin respuestas magnéticas se observa un alto contraste asociado al Volcán La Paila, denotando un salto significativo a partir del lineamiento los Volcanes, el cual, cabe destacar, se trata posiblemente del límite norte estructural de la caldera Chichicuautila, y dicho contraste termina con una ligera disminución de la curva magnética en el lineamiento Amolucan.

El lineamiento Amolucan secciona en dos partes la caldera Chichicuautila, colocando del lado norte el cono cinerítico conocido como Tío Lolo (esto se observa mejor en la vista de planta en la figura 29), este elemento

estructural corresponde a la zona de debilidad donde este cono que bien puede tratarse de un domo resurgente, se emplazó.

La sección termina con una ligera distinción de un gradiente magnético posiblemente ligado a la falla normal Las Navajas, que muestra el bloque basculado hacia la zona de colapso caldérico, por la lejanía no es tan apreciable, pero, como se ha visto, la geología estructural es más representativa en ambos modelos de inversión magnética.

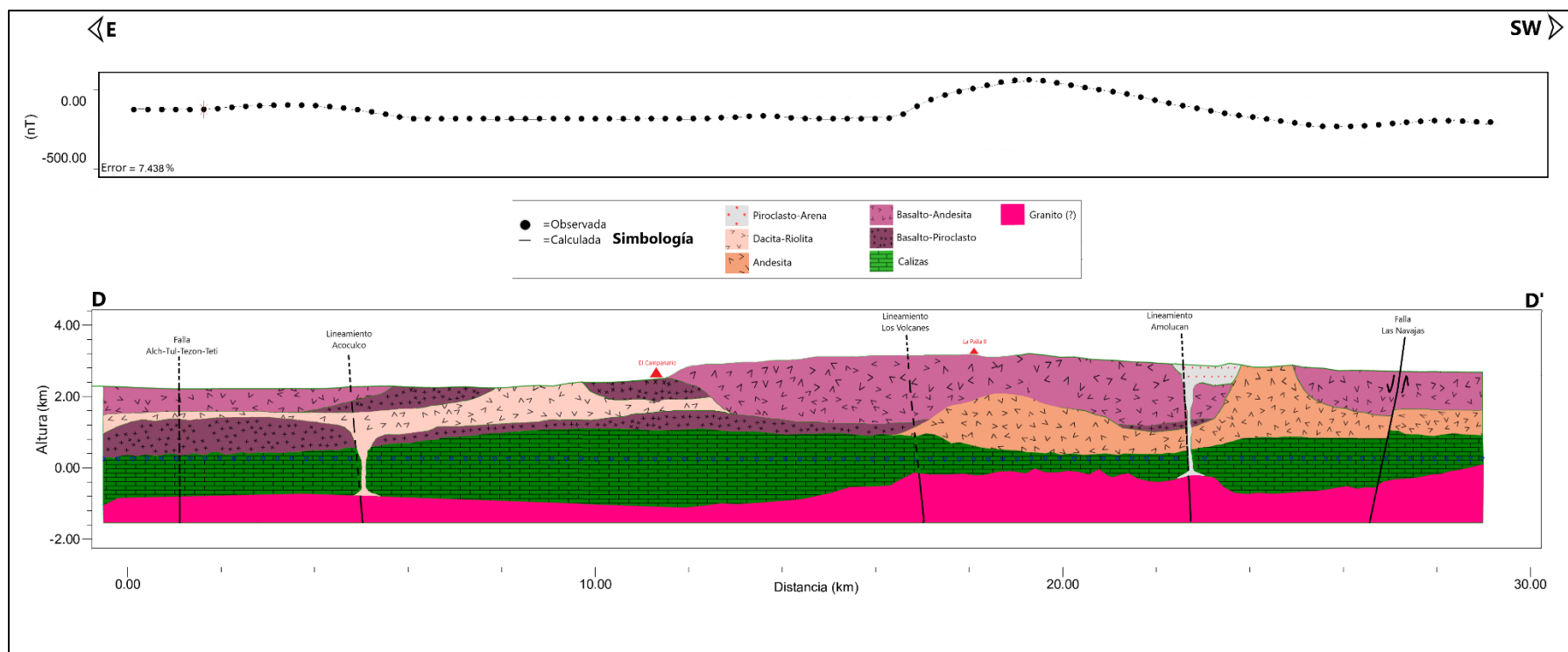


Figura 57. Perfil magnético de la sección geológica D-D' en donde se observa un ajuste de la curva magnética calculada con respecto a la observada, mostrando un error de 7.43%.

Con estos modelos bidimensionales se crea un diseño del subsuelo considerando las rocas aflorantes en superficie y sus respectivas respuestas magnéticas. La configuración de la línea magnética se modificó de modo que existiera el menor grado de error de acuerdo al ajuste de los valores magnéticos calculados (línea negra del perfil magnético) con los valores magnéticos observado o medidos (puntos color negro del perfil magnético), proponiendo y modelando las estructuras acordes con la geología de la zona de estudio. Como se puede ver el error en ambos modelos es menor al 10%, por lo que tiene un grado de certeza alto dentro del rango de error medio permisible (Pérez-Orrego, 2017).

5.4. RECONSTRUCCIÓN DEL VULCANISMO QUE DIO ORIGEN A LA CALDERA CHICHICUAUTLA A PARTIR DE LA MODELACIÓN MAGNÉTICA Y LA HISTORIA VOLCÁNICA DE LA CALDERA TULANCINGO-ACOCULCO.

Las calderas son estructuras volcánicas que tienen una génesis muy compleja y que están relacionadas a eventos eruptivos explosivos. Generalmente se forman a partir de una descompresión de la cámara magmática, esta es inestable y colapsa Avellán *et al.* (2019). Ejemplo de ello es la caldera Chichicautla, la cual se describe a continuación.

5.4.1. Unidades litológicas del complejo volcánico de Chichicautla

a) Riolita-Toba Riolítica (R-TR)-Mioceno (Aquitaniense)

Esta unidad es descrita por el SGM en la carta E14-B12 como una secuencia riolítica con intercalaciones de toba de la misma composición. En la zona de estudio aflora al noreste y oeste de la caldera de Chichicautla, no cubre grandes dimensiones ya que está cubierta por los depósitos volcánicos del Terciario-Cuaternario. Por su similitud con rocas ubicadas fuera de la carta, datadas mediante el método U-Pb en 22.6 ± 0.2 Ma (SGM, 2010), se le considera del Mioceno (Aquitaniense).

b) Ignimbrita-Riolita (Ig-R) - Mioceno medio

Esta roca se reconoce como pequeños afloramientos aislados al sur de la zona de estudio. Estos corresponden a secuencias piroclásticas compuestas de flujos ignimbríticos y lavas riolíticas de espesor variable, observadas principalmente en el cerro La Rinconada. De acuerdo con López-Hernández (2009), esta unidad corresponde a la Ignimbrita Tetlapayac, presente en los alrededores de la Sierra de Apan, cuya edad Ar-Ar es de 12.6 ± 0.4 Ma. Estableciendo, así, durante el Serravalliano un vulcanismo de fase ácida, correspondiente a la primera etapa de formación del complejo Tulancingo-Acocolco.

c) Andesita (A) - Mioceno (Tortoniano)

Se trata de la Andesita Chichicuautila, compuesta por derrames andesíticos expulsados a través de fisuras de antiguos aparatos volcánicos, aflorando al sur del área de estudio, y representa los flujos de lava extravasados durante el colapso del aparato volcánico que precedió a la caldera de Chichicuautila. Esta unidad se incluye con la Andesita Apan, ambas fechadas mediante el método K-Ar, y que reportan edades de 13.4 ± 0.6 y 9.82 ± 0.21 Ma (García-Palomo, 2018), respectivamente, lo cual ubica a esta unidad en el Mioceno (Serravalliano-Tortoniano). Estas rocas son descritas como derrames de color gris oscuro auto-brechados de textura afanítica a porfídica. Tiene un espesor de 300 a 500 m, sin base registrada en el sitio y está cubierta por el vulcanismo Plio-Cuaternario monogenético (García-Tovar, 2015).

d) Dacita-Riolita (Da-R)- Plioceno

Esta unidad aflora al noreste del área de estudio, al norte del volcán Coatzetzengo, el cual representa la etapa extra-caldérica del sistema Tulancingo-Acocolco ($\sim 2.4 - 0.19$ Ma; Avellán *et al.*, 2019).

Los derrames dacíticos-riolíticos que se reconocen en la zona de estudio son relacionados con las rocas de etapa pre-caldera del complejo Tulancingo-Acocolco. Se cree que se trata de lavas expulsadas de domos cercanos a la caldera (El Puente y Terrerillos). Estas rocas son de color gris claro con enclaves de color gris verdoso de una edad de $3.62 \text{ Ma} \pm 22 \text{ Ka}$ (Avellán *et al.*, 2019). Es importante mencionar que esta unidad está intercalada con la Ignimbrita Acocolco, y la mayoría de los afloramientos presentan esta alternancia entre más cerca estén del complejo. Además, la Dacita se encuentra en la secuencia volcánica cortada por el pozo EAC-2, (en los primeros 340 m de profundidad) descansando sobre el cuerpo metamórfico descrito en la figura 23.

e) Toba Basáltica-Basalto (TB-B)-Plioceno

Se localiza en una pequeña área coincidente con el poblado de Cuautepec de Hinojosa, aflora de manera aislada y se relaciona a los últimos eventos volcánicos de la zona de estudio. Avellán *et al.* (2019) reconocen en el borde occidental de la caldera de Acocolco, flujos de lava basáltica y material piroclástico como ceniza, bombas y depósitos de escoria de color negro a gris oscuro asociados con actividad efusiva. De acuerdo con su posición estratigráfica y su limitada presencia, se cree que se formaron en un período inferior a 2 Ma. Dada esta descripción, se cree que se trata de la misma unidad litológica que el SGM describe en la carta F14-D83 como Toba basáltica.

f) Basalto-Piroclasto (B-Pc)-Plioceno/Pleistoceno

Esta unidad se localiza al norte de la caldera de Chichicauautla, y representa una secuencia volcánica predominantemente básica, constituida de Basalto y escoria, siendo las columnas basálticas en forma de prismas de San Miguel Regla las más reconocidas de este grupo litológico. En la sección geológica B-B' se corta una pequeña parte de esta unidad, pero es importante considerarla en la reconstrucción de la caldera para su asociación con los episodios volcánicos post-caldéricos.

g) Domos (Pc-B) - Pleistoceno

Dentro de la unidad anterior se forma un pequeño cono monogenético conocido como Cerro El Campanario, el SGM (2016) lo describe como un afloramiento de material piroclástico producto del mismo aparato volcánico. A un par de kilómetros al sur de esta estructura, se forman otra serie de conos de escoria que muestran una relación con el sistema de fallas regionales NE-SW trazando una tendencia direccional que se refleja en las anomalías magnéticas, estos conos son conocidos como Las Pailas, Coatzetzengo y Tío Lolo.

h) Basalto-Andesita (B-A) - Pleistoceno

Esta unidad aflora al sur y noreste de Tulancingo, y en las cercanías a Chignahuapan y Ciudad Sahagún. Se constituye por depósitos piroclásticos y derrames de composición andesítica a basáltica. El SGM y otros autores la describen como derrames de lava y conos cineríticos de Basalto. El Basalto es gris oscuro, negro y pardo, presenta una estructura compacta y afanítica, además, contiene fenocristales de Olivino y Obsidiana. Se asocian a derrames de aparatos volcánicos y fisurales (Solana-López, 2010). Fue fechada en 2.5 ± 0.7 Ma por medio de K-Ar, lo cual ubica a estas lavas en el límite del Plioceno-Pleistoceno (García-Tovar, 2015).

i) Piroclasto (Pc) - Cuaternario

Integran la última etapa volcánica y cubren grandes zonas en el área de estudio, principalmente, planicies y sub-cuencas rellenas por depósitos piroclásticos, fluviales y lacustres que rodean a las estructuras volcánicas Plio-cuaternarias y miocénicas. Además de caracterizar los numerosos conos de escoria y coronar derrames máficos formados en toda la extensión del Campo Volcánico Apan-Acocolco (García-Tovar, 2015).

A continuación, se representa la litología anteriormente descrita en la columna estratigráfica de la zona. La base de la estratigrafía inicia desde el basamento calcáreo y el cuerpo plutónico que se infiere formó la caldera, así como el paquete de rocas volcánicas que sobreyacen y dominan las rocas antiguas de la región.

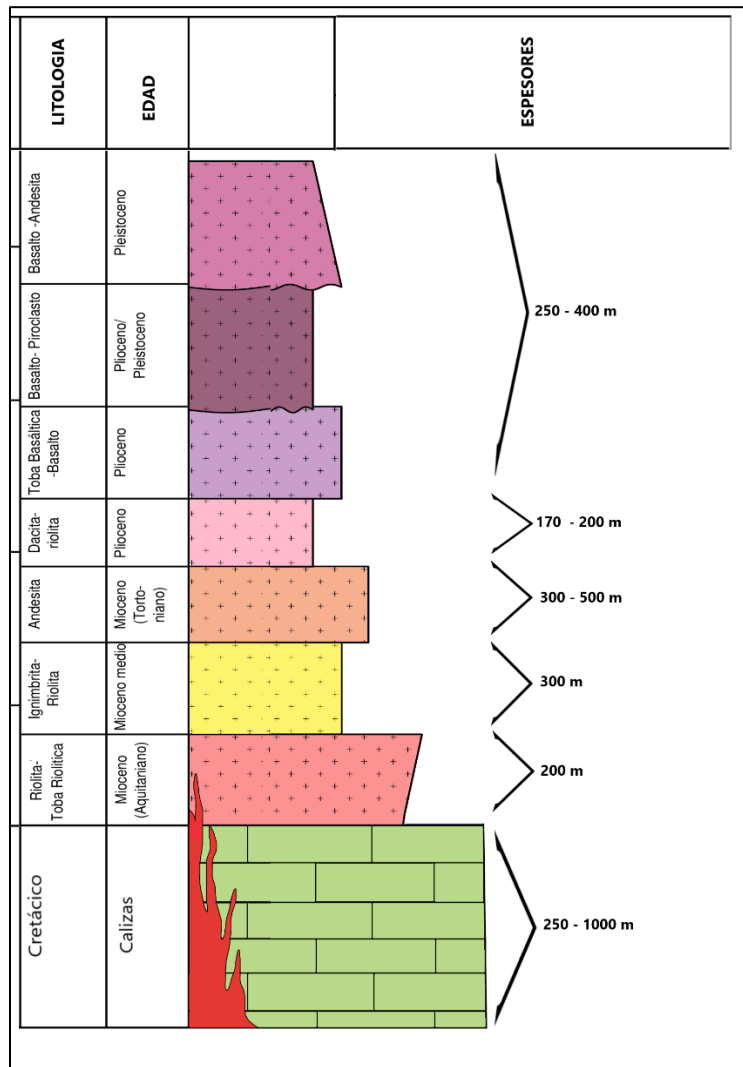


Figura 58. Columna estratigráfica de la zona de Chichicauatla.

En la figura 58 se esquematiza la secuencia estratigráfica reconocida e inferida (en el caso del intrusivo) en la zona de estudio, para la estimación de espesores se consideraron las investigaciones de diferentes autores (López-Hernández, 2009; Hernández-Avelino, 2008; Andrade-Enríquez, 2020) en sitios cercanos.

5.4.2. Origen y evolución de la caldera Chichicauatla

Las unidades representadas en la serie de eventos que dieron origen a lo que hoy es la caldera Chichicauatla se dividieron en 3 eventos: pre-caldera, sin-caldera y post-caldera, correspondientes a diferentes fases de formación definidas por la distribución, posición estratigráfica y edad de las rocas conocidas en el sitio.

En esta parte del documento, se describen todas las unidades circundantes de la caldera, y de las cuales se tomó la información recopilada por otros autores y la modelación magnética para proponer las etapas de

formación del principal cuerpo volcánico del sitio y vincular una fuente de calor para el posible sistema geotérmico de la zona.

a) Etapa pre-caldera

Durante la primera etapa de formación de la caldera se tiene la existencia de una estructura volcánica predecesora a la caldera, esto considerando la forma circular y los bordes definidos de la estructura por la modelación magnética. Tomando en cuenta esto y la génesis de una caldera por colapso, la caldera Chichicuautila se formó a través de la explosión de un volcán andesítico durante el Mioceno (figura 59A). Existen diferentes factores que posiblemente provocaron el colapso de la caldera, la morfología es una de ellas, por ejemplo, las formas lenticulares de una cámara magmática tienen menor soporte central y provocan el hundimiento del aparato; la impermeabilidad del techo, puesto que si es lo suficientemente impermeable pero delgado permite la acumulación de gas a presiones altas y puede provocar la inestabilidad del reservorio magmático; planos de fractura que desequilibran el medio; y la cercanía de la cámara magmática a la superficie (Llambías, 2001). Para este caso se infiere que el origen de la caldera Chichicuautila estuvo relacionada a planos de debilidad, fallas precedentes de un evento más regional (la formación de la caldera de Tulancingo) descrito por Andrade-Enríquez (2020) como estructura de tipo graben generada por una estructura explosiva vulcano-tectónica de colapso de ignimbritas. López-Hernández (2009) describe la caldera de Tulancingo como un centro eruptivo de 32 km de diámetro dentro del complejo Volcánico Tulancingo-Acocolco de edad Mioceno-Plioceno en la que la caldera de Tulancingo tiene una edad >3.0 Ma y la caldera de Acocolco se creó al interior de la primera entre los 1.7-0.9 Ma teniendo un diámetro menor (18 km aproximadamente).

b) Etapa sin-caldera

En esta etapa sucedió el hundimiento de la cámara magmática a raíz de la formación de fallas normales producto de los esfuerzos distensivos al ascender el flujo magmático y a la descompensación de esfuerzos durante la pérdida de volumen de la cámara magmática todo esto durante la primera etapa de formación de la FVTM que tuvo lugar entre los 10-9 Ma (Mioceno tardío), esta fase se caracteriza por el emplazamiento de grandes mesetas andesítico-basálticas en el sector occidental y central del territorio (Ferrari, 2000). En el fenómeno de colapso las paredes del edificio volcánico se destruyen durante la erupción dejando una morfología muy particular, principalmente fracturas semicirculares en las que solo se conserva una parte del edificio volcánico y suele ser el flanco menos expuesto a las exhalaciones y al flujo de lava. En la caldera Chichicuautila es el flanco Norte el colapsado y el flanco sur se conserva como escarpe de la subsidencia y se caracteriza morfológicamente por su trazo anular y el límite topográfico que representa en el área. El episodio eruptivo depositó lavas andesíticas en diferentes direcciones y formó nuevas estructuras

probablemente asociadas al ascenso de desprendimientos de la misma cámara magmática o simplemente a la cobertura de las rocas antiguas por lavas andesíticas (figura 59B).

c) Etapa post-caldera

Finalmente, la cámara magmática tiende al equilibrio formando generalmente nuevas estructuras en la zona de subsidencia conocidas como domos resurgentes o domos intra-calderas. En este caso, se infiere que el volcán Tío Lolo puede tratarse del domo resurgente de la caldera Chichicautla al situarse justo en el centro de esta y asociarse a un evento volcánico posterior reconocido por una secuencia de material piroclástico (escorias, brechas y ceniza) del Plioceno tardío-Pleistoceno (Solana-López, 2010), y al reconocerlo como un domo post-caldera se reactiva la cámara magmática permitiendo la formación de conos de escoria y el emplazamiento de un dique andesítico bajo la estructura caldérica (López-Hernández, 2009). Además de los conos de escoria formados después del evento explosivo, el campo volcánico continuó activo y posteriormente episodios dacíticos y basálticos coronaron los vestigios del violento vulcanismo que llevó a la desaparición parcial de todo el edificio volcánico (figura 59C).

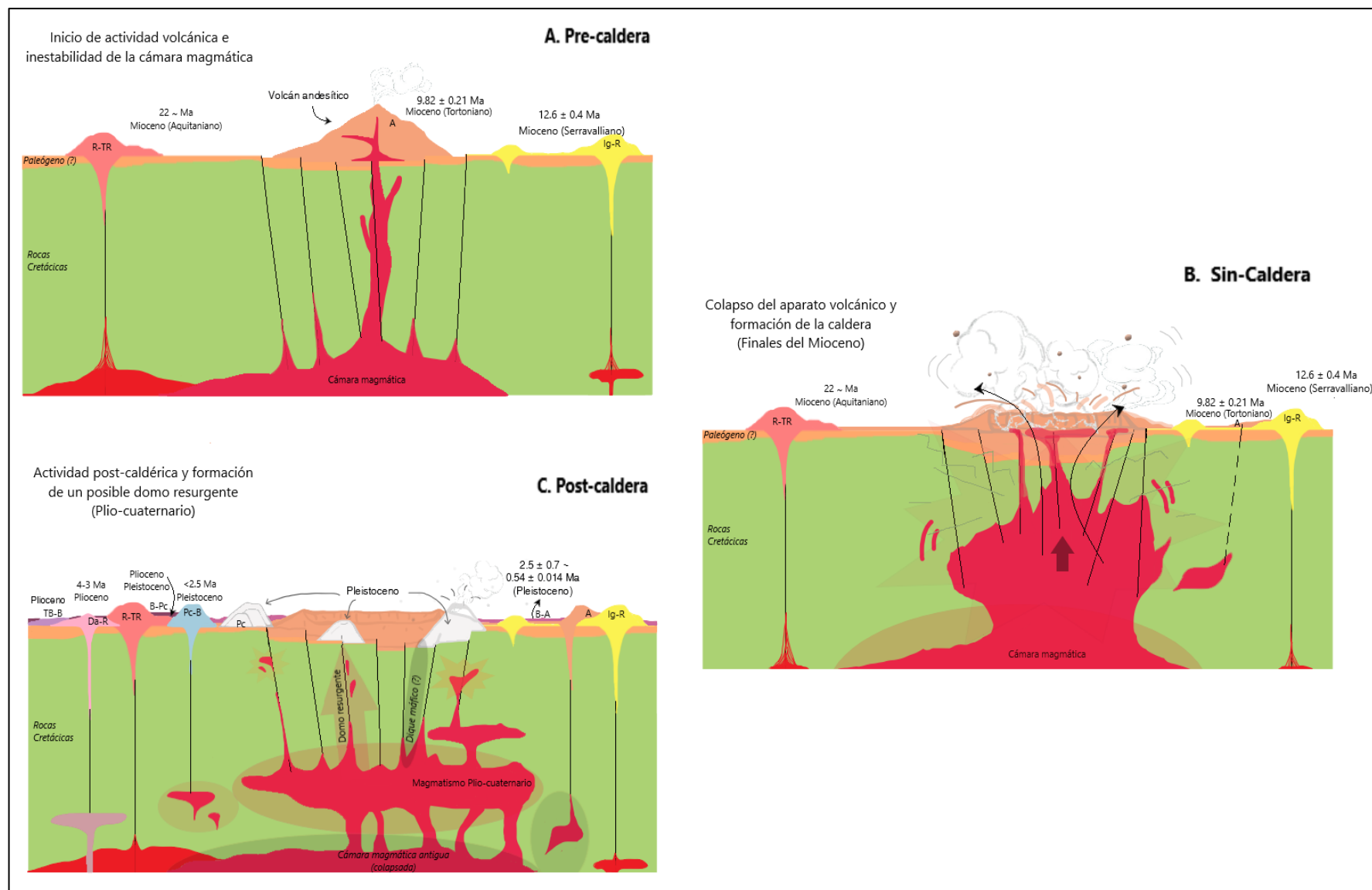


Figura 59. Reconstrucción geológica de los eventos genéticos de la caldera de Chichicauatl.

En la figura 59 la ubicación de los centros eruptivos en la periferia de la caldera se muestra en vista longitudinal a la sección geológica A-A' con vista del poniente al oriente. Se generalizan y proponen las fases de la caldera de colapso del volcán andesítico predecesor. La caldera tiene 8 km de diámetro y se reconoce por el escarpe topográfico de la ladera sur, la falla normal reconocida en la zona del hundimiento se relaciona coincidentemente con lineamientos al norte de la caldera (ver figura 29: lineamiento curvilíneo identificado en el flanco Norte de la caldera Chichicuautila).

La litología dominante es netamente de origen volcánico, antes del colapso caldérico dominaban los depósitos riolíticos asociados a un vulcanismo ácido, estos incluían tobas, ignimbritas, riolitas y dacitas del Mioceno.

5.5. POTENCIAL HÍDRICO

El modelo de potencial geotérmico (figura 15) y las diferentes figuras en alto relieve obtenidas en la primera etapa de este proyecto de investigación permitieron definir que los dos sectores potencialmente geotérmicos coinciden geomorfológica y espacialmente con valles (Valle del Mezquital en el sector NW y Valle de Tulancingo en el sector SE), estos se encargan de mantener la recarga y descarga de los acuíferos de las zonas (Lesser-Carrillo *et al.*, 2007-2011).

Con esta información, se reconoce que el recurso hídrico es una variable esencial para definir la futura viabilidad de explotación geotérmica de dichos sectores, claro, considerando un sistema geotérmico común, el hidrotermal, el cual funciona a base de vapor y agua. Sin embargo, la situación de sobre-explotación de los acuíferos: Valle de Tulancingo, Cuautitlán-Pachuca (sector SE) y Huichapan-Tecoautla (Sector NW) no favorece a los sistemas geotérmicos convencionales (hidrotermales) en el estado de Hidalgo, si bien es sabido que el agua es el “combustible” de los sistemas geotérmicos, no son los de tipo hidrotermal los únicos que existen. Como se mencionó anteriormente existen otros tipos de sistemas geotérmicos que requieren únicamente de la fuente de calor para ser considerados como un recurso aprovechable.

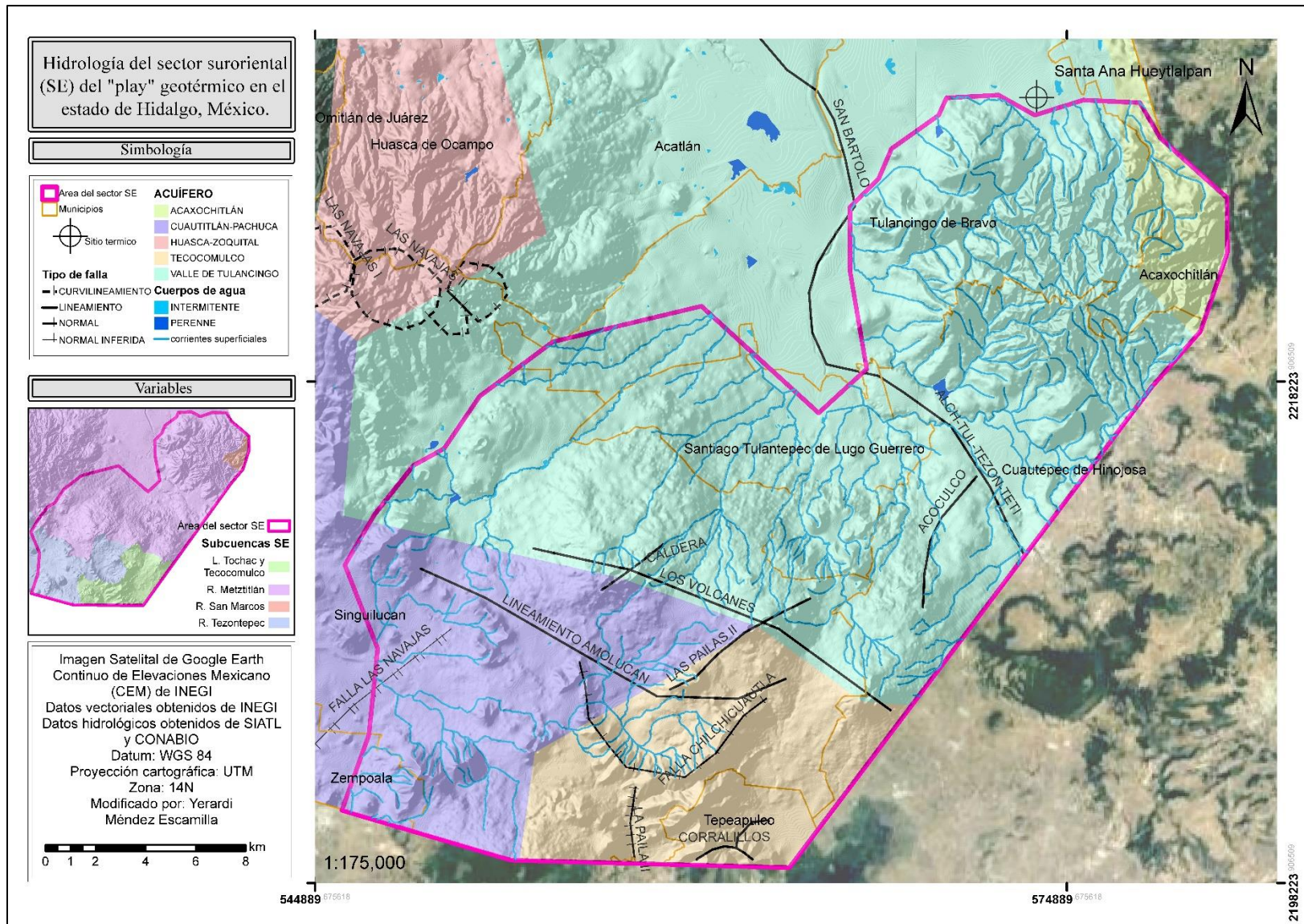


Figura 60. Mapa hidrológico de la zona de estudio.

Como se puede ver en la figura 60, cerca de un 80% de la zona de estudio se encuentra en dos de los acuíferos más sobreexplotados del estado de Hidalgo: el acuífero Valle de Tulancingo (color azul) y el acuífero Cuautitlán-Pachuca (color morado).

De acuerdo con la información presentada a partir del cálculo de la disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA) en el documento oficial “Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, estado de México” de CONAGUA (2020) presenta un déficit de -188, 696,710 m³ anuales que se están extrayendo a pesar de la crítica situación de recarga, provocando su sobreexplotación. En el caso del acuífero del Valle de Tulancingo el déficit es de -20,935,400 m³ anuales.

Las condiciones de déficit de ambos acuíferos fueron calculadas por CONAGUA (2020) conforme a la metodología indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000; se resta al volumen de recarga total media anual (R), el valor de la descarga natural comprometida (DNC) y el volumen de extracción de aguas subterráneas (VEAS).

Por lo tanto, la disponibilidad de aguas subterráneas, sigue la siguiente fórmula:

$$FDMA = R - DNC - VEAS$$

Fórmula 12. Fórmula de la disponibilidad media anual de agua subterránea (DMA)

Otras características a considerar sobre los acuíferos y sus limitantes para aprovecharlos en los recursos geotérmicos de la zona, es su categorización. Conocer el tipo de acuífero permite saber su capacidad de recuperación determinado por el grado de permeabilidad que lo caracteriza y del mismo modo considerar la recarga de los mismos.

Como se describió en la teoría, el agua es el combustible base de un sistema geotérmico común, generalmente, la formación permeable (acuífero) debe ser somero o presentar buena conexión hidráulica hacia la superficie para favorecer la entrada de agua meteórica y en consecuencia poder mantener una recarga segura. En caso contrario se necesita un medio o vía de transferencia por donde el agua pueda infiltrarse desde la superficie, y esto es, a través de un sistema de fallas. Existe una gran variedad de formaciones rocosas permeables que permiten la existencia de un reservorio, pero las fallas, fracturas y zonas de debilidad favorecen mucho más el almacenamiento y transporte del recurso hídrico.

5.5.1. Acuíferos de la zona de estudio

a) Cuautitlán- Pachuca

CONAGUA (2020) define al acuífero como uno de tipo semi-confinado contenido en las secuencias volcánicas de composición riolítica-dacítica Oligo-miocénicas integran la unidad hidrogeológica, esta se divide en dos: basal y superior. La primera se caracteriza por una permeabilidad baja dominada por

materiales riolíticos; mientras que en la segunda dominan rocas andesíticas intensamente fracturadas, que hacen de esta unidad la de mejor permeabilidad y se considera el acuífero principal y el más profundo. Localmente en las secuencias cuaternarias se forman acuíferos colgados de bajo potencial, sin embargo, es únicamente el acuífero de tipo semi-confinado el que actualmente se encuentra en extracción.

b) Valle de Tulancingo

Las evidencias geológicas, estructurales, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir al acuífero de tipo libre conformado por dos unidades hidrogeológicas, heterogéneas integrado por sedimentos fluvio-aluviales y piroclásticos, siendo esta la parte granular del acuífero, mientras que la zona fracturada está dominada por rocas volcánicas, que presentan características de semi-confinamiento definido por depósitos arcillosos y una colada de Basalto muy compacta de 50 metros de espesor que de manera local se distingue como acuitardo. La primera unidad es somera y se limita al sur del valle y en espesor entre los 20 y 40 m. La segunda unidad es el acuífero profundo y es el que abastece a la población y en el que más pozos de extracción se instalan, abarca casi en su totalidad al valle y su espesor supera los 300 m. Se sabe que en el basamento calcáreo existe un acuífero confinado por lutitas y limolitas a mayor profundidad que no se ha explorado (CONAGUA, 2020).

Con base en esta información se conoce que el medio de transporte común de fluidos calientes a través del sistema geotérmico se puede ver limitado por la sobre explotación del recurso hídrico en la zona de estudio, proponiendo el posible aprovechamiento del recurso geotérmico a través de un sistema geotérmico no convencional, esto quiere decir que en la zona de estudio que comprende los acuíferos de Tulancingo y Cuautitlán-Pachuca (70% de la zona de estudio) se puede aprovechar la fuente de calor sin fluidos de transporte conocidos como sistemas “*rock hot dry*” (roca seca) por su condición de déficit y el 30% se ubica en los acuíferos de Tecocomulco y Acaxochitlán de los cuales se podría obtener el recurso hídrico para una futura explotación geotérmica a través de EGS.

5.6. MODELO CONCEPTUAL

Con el modelo conceptual (figura 61) se conjuntan los resultados de toda la información generada en este proyecto de investigación.

Por medio del modelo de inversión magnética bidimensional se confirmó la existencia de cuerpos magnéticos que se correlacionan con las estructuras geológicas en superficie corresponden a las anomalías que representan el origen de estas. Las anomalías magnéticas del CMRP se asociaron a las cámaras magmáticas de los edificios volcánicos y la componente estructural de la zona, además, las fallas delimitan con precisión los contactos morfológicos de las estructuras principales y de los bordes de las anomalías.

La caldera Chichicautla es la estructura principal y los conos cineríticos adyacentes post-caldéricos se observan unidos a una misma infiriendo geometrías y dimensiones a los cuerpos que integran las fuentes principales del sistema geotérmico. Con este modelo se afirma que las intrusiones más someras del cuaternario son la fuente de calor de los posibles recursos geotérmicos debajo de la caldera Chichicautla y sus alrededores.

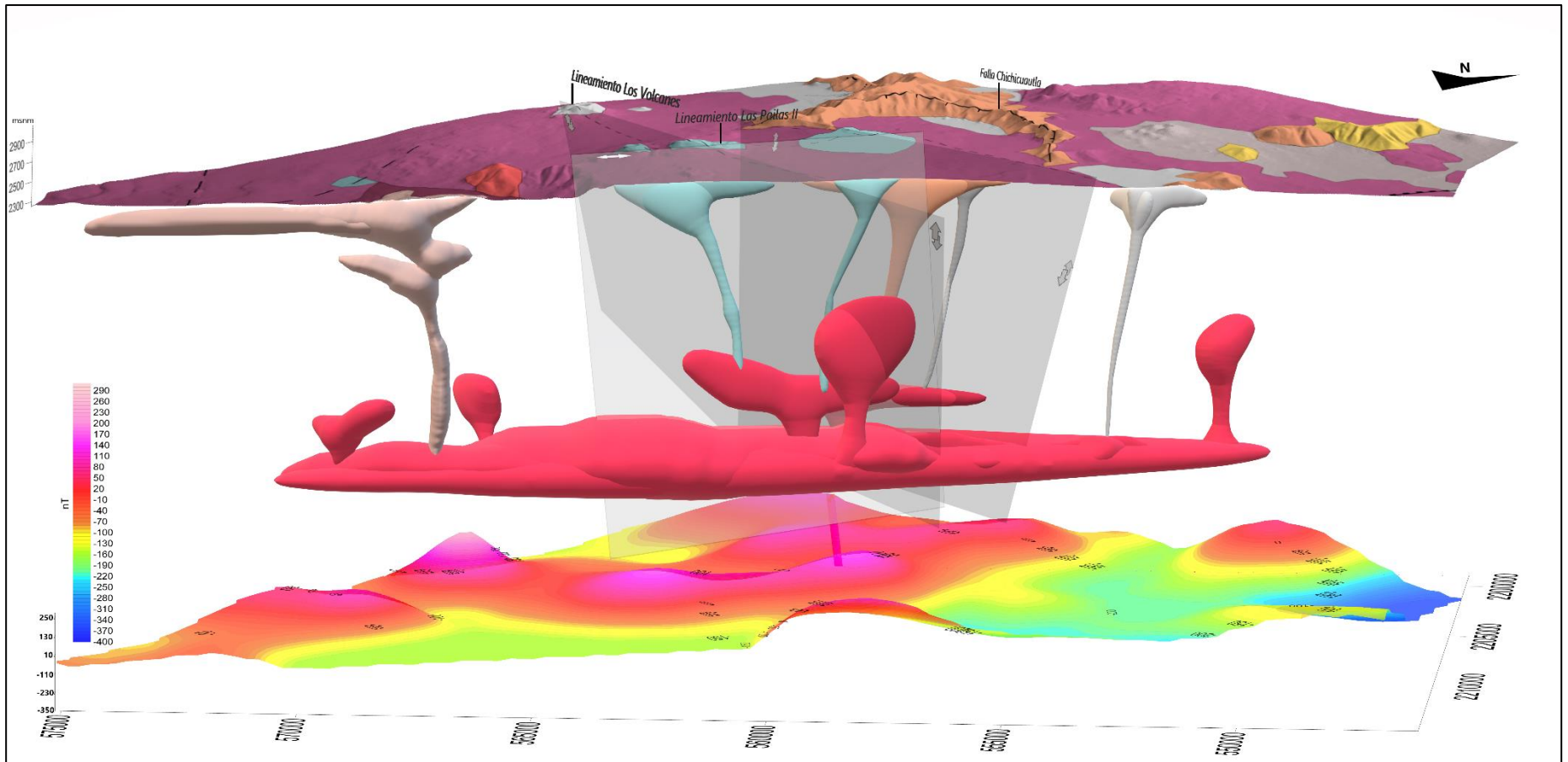


Figura 61. Modelo Conceptual del posible Sistema Geotérmico existente en la porción SE del estado de Hidalgo. Vista desde el Norte hacia el SE.

Como se puede observar en el modelo (figura 61), se propone la existencia de la cámara magmática de la caldera Chichicuautila aun con calor remanente contenido en las fuentes de los domos y volcanes posteriores al colapso y a una menor profundidad que la original. Esto se confirmó con la magnetometría, ya que los altos magnéticos contrastaban notablemente en los lineamientos y fallas asociadas a los conos volcánicos. En la figura 61 se representan de igual modo los planos de fractura principales asociada al área colapsada de la caldera Chichicuautila considerando estos los más importantes debido a su estrecha relación con la morfología post-colapso.

En este caso particular, se trata de un sistema geotérmico formado por una caldera, y es muy importante definir el origen y la estructura interna post-colapso para comprender mejor las rutas de los fluidos y la ubicación de los reservorios.

Los límites estructurales son principalmente una falla anular (normal) localizada al sur de la caldera, la falla precedente de la forma basal original del aparato volcánico reconocida en superficie como el lineamiento Los Volcanes en el flanco norte (figura 61), que si bien es posterior es representativo debido a que puede considerarse como un elemento estructural favorecedor para el flujo de calor hacia superficie o cercano. El lineamiento Las Pailas tiene la misma relevancia porque su rumbo transversal a los planos anteriores propicia un mayor grado de fracturamiento por la convergencia en dos sentidos (N-S y E-W) de estas zonas de fractura y permite la transferencia de calor en el subsuelo, pues entre mayor permeabilidad exista mayor es el grado de aprovechamiento de un recurso geotérmico.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta tesis proporciona una nueva metodología en el campo de la geotermia, específicamente para la etapa de prospección de zonas con potencial geotérmico en la porción central del estado de Hidalgo. Combinando los datos suficientes (Geología, Geomorfología, flujo de calor, Crono-estratigrafía, Magnetometría) con SIG (álgebra de mapas) se puede proponer a futuro de manera fundamentada una exploración a detalle.

A partir de todos los procedimientos y análisis realizados, se presentan las siguientes conclusiones:

- El vulcanismo miocénico que formó la Faja Volcánica Transmexicana generó un *trend* geotermal NW-SE en la porción central del estado de Hidalgo localizado a partir del análisis de manifestaciones geotérmicas desde Tecozautla hasta Santa Ana Hueytlalpan (municipio de Tulancingo).
- El “*play*” geotérmico dominado por convección con base en la modelación geofísica, la geología, tectónica y manifestaciones termales, permite concluir que es de tipo Campo Volcánico de Origen Magmático o por su definición en inglés *Volcanic Field Type- Magmatic*.
- Se definieron dos zonas con potencial geotérmico en la porción central del estado de Hidalgo mediante álgebra de mapas, una localizada en el sector NW (previamente estudiada por CFE) y otra al SE.
- La porción SE (suroriental) se definió como una nueva zona con potencial geotérmico ya que se caracteriza por la edificación de una caldera de colapso del Terciario-Cuaternario con un sistema de fallas normales, que desempeñan un papel importante en el sistema geotérmico albergado bajo la caldera Chichicautla como conducto o barrera de fluidos.
- Existe una anomalía magnética de 6 km de diámetro al sur del sector SE que se correlaciona con la fuente de la caldera Chichicautla.
- Los cuerpos delimitados por el CMRP pertenecen a una misma fuente de calor fragmentada debido a la paulatina sucesión de eventos volcánicos que los formaron.
- La zona SE alberga una fuente de calor viable para la exploración de recursos geotérmicos debido a la edad relativamente joven del vulcanismo y de la alta probabilidad que se conserve latente el calor de dichos cuerpos.

- Las intrusiones jóvenes (domos resurgentes) proporcionan una fuente con potencial geotérmico y en el caso de la caldera Chichicautla la respuesta magnética se asocia al remanente máfico de la cámara magmática (dique andesítico producto del colapso).
- Con la modelación de las secciones geofísicas C-C' y D-D' se definieron y delimitaron la falla Chichicautla, lineamiento Los Volcanes y lineamiento Las Pailas dentro del área de colapso de la caldera, así como su comportamiento cinemático.
- Mediante álgebra de mapas y la modelación geofísica (magnetometría) se realizó un modelo geológico conceptual de la zona SE (suroriental) del estado de Hidalgo.
- El recurso hídrico de los acuíferos Valle de Tulancingo y Cuautitlán-Pachuca es limitado por lo que el potencial geotérmico se define como un sistema de roca seca: es decir un sistema geotérmico no convencional.
- El sistema geotérmico de la caldera Chichicautla mediante el análisis geofísico, demuestra que los límites estructurales mantienen la cámara magmática fragmentada en los diferentes reservorios de magma originando los domos y conos volcánicos, con altas probabilidades de que estas fuentes de calor se conserven latentes.
- Con el modelo geológico-geofísico 3D se detallaron las características de las fallas geológicas y cuerpos (estructuras) asociados a las fuentes de calor de origen volcánico.

6.2. RECOMENDACIONES

Es importante no ignorar que el presente trabajo se realizó con recursos e información disponible y de uso libre, la recopilación de los datos y todo el trabajo fue de gabinete, sin embargo, no se debe descartar hacer en un futuro la etapa de campo correspondiente sobre el área de trabajo.

A partir de los conocimientos brindados con el mapa de potencial geotérmico obtenido en la primera etapa de este trabajo de investigación se puede elaborar un proyecto más completo con la planeación de campañas locales de exploración en la zona de estudio.

Es conveniente realizar una campaña de exploración con métodos directos que permitan confirmar lo descubierto con este trabajo, además de métodos geofísicos a detalle para caracterizar la zona, como por ejemplo métodos eléctricos como SEV y TER, así como electromagnéticos como TEM, AMT y MT.

Es conveniente mapear a detalle el área de estudio integrando análisis estructural, petrográfico-petroológico, geoquímico, estratigráfico y alteraciones hidrotermales que permitan una mejor interpretación del campo eruptivo de Chichicautla.

Realizar análisis hidrogeoquímico de pozos o norias cercanas ya que no se cuenta con esa información y complementar con análisis de fluidos hidrotermales daría mayor certeza al resultado obtenido en este trabajo.

Se recomienda que en la etapa de exploración de áreas geotérmicas exista mayor inversión e investigación, para determinar las anomalías elevadas de flujo de calor, las cuales son la base para definir recursos geotérmicos.

REFERENCIAS

- Abdeslam, I., Fehdi, C., Djabri, L. (2017). Application of drastic method for determining the vulnerability of an alluvial aquifer: Morsott - El Aouinet north east of Algeria: using arcgis environment. *Energy Procedia*.119(1). 308-317
- Agüero-Valverde, J., Pujol, R. (2000). Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica. Conference: VII Conferencia Anual Latinoamericana de Usuarios ESRI /Erdas y VI Conferencia Internacional de Topografía. 17-26.
- Aguilar-Dumas, A. (2008). Análisis geológico-productivo enfocado a la exploración de la parte oriental del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*. 21(1), 2-25.
- Aguirre-Díaz, G. J. (1996). Volcanic stratigraphy of the caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt. *Revista Mexicana de ciencias geológicas*. 13 (1), 10-14.
- Akingboye A. Sunny, Ademila Omowumi, Ogunyele A. Chris (2018). Improved Magnetic Data Analyses and Enhancement Techniques for Lithological and Structural Mapping Around Akure, Southwestern Nigeria. *Earth Sciences Malaysia (ESMY)*. 2 (1), 16-21.
- Albert, H., Costa, F., Martí, J. (2016). Years to weeks of seismic unrest and magmatic intrusions precede monogenetic eruptions. *Geology*. 44 (3), 211-214.
- Almirudis, E., Guevara, M., Santoyo, E., Torres-Alvarado, I. S., Paz-Moreno, F. (2015). Geothermal energy potential of a promissory area in the Central and Eastern zones of Sonora, Mexico: A preliminary geochemical study. In Proceedings of the World Geothermal Congress.1- 9.
- Andrade-Enriquez, K.K. (2020). Interpretación de la gravimetría del Complejo volcánico Tulancingo – Acapulco estados de Hidalgo y Puebla y su relación con el sistema geotérmico [Tesis de Licenciatura]. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Aragón-Aguilar, A., Izquierdo-Montalvo, G., López-Blanco, S., Gómez-Mendoza. (2015). Stored Heat Evaluation in Geothermal Systems: A Case of a Mexican Field. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications*. 5(5). 1-9.
- Aragón, E., Pinotti, L., D'Éramo, F., Gómez-Ortiz, D., Tejero, R., Tubia, J.M^a., Cavarozzi, C.E., Aguilera, Y.E., Ribot, A., Gianibelli, J. y Chernicoff, C.J. (2009): Anomalías magnéticas en la caldera Piedra Parada, Patagonia, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*. 22 (3-4), 137-144.
- Arellano, V.M., Torres, M.A., Barragán, R.M.& López, F.N. (2005). Evolución termodinámica (1982-2002) de los fluidos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. (México). *Ingeniería Hidráulica en México*. 2(1),77-87.
- Avellán, D.R., Macías, J.L., Layer, P.W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M.G., Cisneros-Máximo, G., Sánchez-Núñez, J.M., Martí, J., García-Tenorio, F., López-Loera, H., Pola, A.,

- Benowitz, J. (2019). Eruptive chronology of the Acoculco caldera complex – A resurgent caldera in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of South American Earth Sciences*. 98 (1), 1-16.
- Avendaño-Cortes, J. (2017). Modelo térmico y de conductividad eléctrica en la caldera Tulancingo-Acoculco, Puebla. Ensenada, Baja California., [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
 - Aviña-Jiménez, H.M., Benítez-Torreblanca, M.A., & García-Gutiérrez, A. (2016). Cascade Use of Geothermal Energy in Mexico. *GRC Transactions*. 40. 169-172.
 - Calcina, M. (2009). Un modelo dinámico para el campo geomagnético. *Revista Boliviana de Física*, 15(15), 44-62. Recuperado en 11 de marzo de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232009000100008&lng=es&tlng=es.
 - Canet, Carles, Franco, Sara I., Morelos-Rodríguez, Lucero, Rajabi, Abdorahman, & Núñez-Useche, Fernando. (2021). Apunte geológico y revisión histórica de la zona geotérmica de Pathé, Hidalgo. *Geofísica internacional*. 60(3), 258-279.
 - Castellanos-Fajardo, L.A. (2017). Diplomado en Análisis de Información Geoespacial. Centro de Investigación en Geografía y Geomática, México, CDMX. Recuperado de: <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/154>
 - Catalán, M., & Martos, Y.M. (2016). Las anomalías magnéticas, tan útiles, tan olvidadas. Magnetic anomalies: useful, but not widely known. *British Antarctic Survey*.1. 315-324.
 - Cataldi, R., & Maireni, A. (1995). “Geothermal Ranking and Resource Assessment of Costa Rica.”. *Proceedings of the World Geothermal Congress*. 497-502 .
 - Centro Mexicano de Innovación en Energía Térmica (CeMIEGeo). (2014-2019). ¿Qué es la Geotermia?. Recuperado de: <http://www.cemiegeo.org/index.php/que-es-la-geotermia>
 - Chen, T., Clauser, C., y Marquart, G. (2017). Efficiency and accuracy of equivalent fracture models for predicting fractured geothermal reservoirs: the influence of fracture network pattern. *Energy Procedia*. 125(17), 318-326.
 - Chernykh, V.V. (2015). Paradoxes of stratigraphy. *Russian Geology and Geophysics*.56(4), 532-540.
 - CONAGUA. (2020). Estadísticas del Agua en México. Conagua, Semarnat. México. SINA, Acuíferos. Recuperado de: http://sina.conagua.gob.mx/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=acuiferos

- CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautitlán-Pachuca, estado de México. Recuperado de: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/edomex/DR_1508.pdf
- CONAGUA. (2020). Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Valle de Tulancingo, estado de Hidalgo. Recuperado de: https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1317.pdf
- Daniilidis, A., M. Nick, H. & Bruhn, D.F. (2020). Interdependencies between physical, design and operational parameters for direct use geothermal heat in faulted hydrothermal reservoirs. *Geothermics*. 86(20), 12-14.
- Christopher, PH, Moskowitz, BM y Banerjee, SK, 1995. Propiedades magnéticas de los minerales de las rocas. Roca Física y relaciones de fase, un manual de física constantes, Unión Geofísica Estadounidense, 189-204.
- Dears, D. (2015). ‘Hot Rocks’ Advanced Geothermal: A Reality Check. Institute For Energy Research. *Master Resource*. 1 (1), 1-3.
- Diamond, L. W., Wanner, C. y Waber, N. H. (2018). Penetration depth of meteoric water in orogenic geothermal systems. *Geology*. 46 (12): 1063–1066.
- Doust, H. (2010). The exploration play: what do we mean by it?. *AAPG Bulletin*. 94(11), 1657-1672.
- Environmental and Engineering Geophysical Society [EEGS]. (sf). What is Geophysics?. Recuperado de <https://www.eegs.org/what-is-geophysics->
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2016). Conceptos del conjunto de herramientas de Superposición. Recuperado de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-weighted-sum-works.htm>
- España-Bernardino, J.M. (2017). Análisis Aeromagnético del complejo dómico “Las Derrumbadas”, en el estado de Puebla: San Luis Potosí, S.L.P. Instituto Potosino De Investigación Científica Y Tecnológica, A.C., [Tesis de Maestría], 91.
- Espinoza Ojeda, O.M., Prol-Ledesma, R.M., Iglesias, E.R. (2017). Continental heat flow data update for México – Constructing a reliable and accurate heat flow map. 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. 14.
- Fanton, G., Martinez, M., Gimenez, M. (2015). Processing and Qualitative Data Analysis with Views Aeromagnetic Exploration Type Hydrothermal Deposits Lode Gold - La Rioja Province, Argentina. *GEOACTA*. 39 (1). 30-50.
- Ferrari L. (2000), Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, V. LIII,84-92.

- Flores-Armenta, M., Y Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2011). Geothermal Activity and Development in Mexico. Short Course on Geothermal Drilling, Resource Development and Power Plants. UNU-GTP and LaGeo, en Santa Tecla, El Salvador. 16-22.
- Galván-Pineda, J. (2016). Métodos potenciales y electromagnéticos aplicados a la modelación bidimensional del volcán tipo maar “La Joyuela”: San Luis Potosí, México., [Tesis de maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí, S.L.P.
- Ganguly, S., Mohan-Kumar, M. S., (2016). Geothermal Reservoirs – A Brief Review. *Journal Geological Society Of India*.79(1), 589-602.
- Gangulya, S., Tan, L., Date, A., Subbarayappa, M., y Kumarb, M. (2017). Effect of Heat Loss in a Geothermal Reservoir. *Energy Procedia*. 110(3), 77-82 .
- García-Palomo, A., Macías, J.L., Jiménez, A., Tolson, G., Mena, M., Sánchez-Núñez, J.M., Arce, J.L., Layer, P.W., Santoyo, M.A., Lermo-Samaniego, J. (2018). NW-SE Pliocenequaternary extension in the Apan-Acocolco region, eastern Trans-Mexican volcanic belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 349, 240-255.
- García-Palomo, A., Macías, J., Garduño, V. (2000). Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca volcano region, Central Mexico: Tectonophysics, 318, 281-302.
- García-Tovar, G.P., Martínez-Serrano, R.G., Solé, J., Correa-Tello, J.C., Núñez-Castillo, E.Y., Guillou, H., Monroy-Rodríguez, E., 2015, Geología, geocronología y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco, Faja Volcánica Transmexicana: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 32, núm. 1, p. 100-122.
- Georgsson, L.S. (2013). Geophysical methods used in geothermal exploration. UNU-GTP, GDC and KenGen. Course VIII on *Exploration for Geothermal Resources*, Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, 16 pp.
- Geyne, A. R., C. Fries, K. Segerstrom, R. R Black, I. F. Wilson y A. Probert. (1963). Geología y yacimientos minerales del distrito Pachuca Real del Monte, estado de Hidalgo, México, Publicación 5E, Consejo de Recursos Naturales No Renovables, México.
- Gómez-Tuena, Arturo., Orozco-Esquivel, Teresa., & Ferrari, Luca. (2007). Igneous petrogenesis of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geological Society of America*. 4 (22), 129-181.
- González, Zayre., & García-Zarate, Marco. (2019). Geothermal Energy as an Alternative to Reduce Atmospheric Emissions and Provide Green Energy. *Green and Emerging Technologies to Help the Environment*. 1,1-17.
- González-Partida, E., Tello-Hinojosa, E.& Pal-Verma, M.(2001). Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 7(2),185-194.

- Grupo Visiona (sf). Geotermia. Recuperado de <http://www.grupovisiona.com/es/geotermia>.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2015). Cerro Prieto, Mexico — A Convective Extensional Geothermal Play. *GRC Transactions*. 39(1), 711-716.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (2019). Current status of geothermal-electric production in Mexico: *IOP Conference Series. Earth and Environmental Science*. 249, 1-11.
- Hernandez-Avelino, I. (2008). Caracterización geológica y petrológica de la estructura circular Mezquital (estado de Hidalgo) y su posible riesgo geológico. [Tesis de maestría]. Instituto Politecnico Nacional Unidad Ticoman. México, D.F. 12-24 p.
- Hiriart, G. (2017). Private Geothermal Opportunities in Mexico. *GRC Transactions*. 41(1), 1-8.
- Hunt, C.P., Moskowitz, B.M., & Banerjee, S.K. (2013). Magnetic Properties of Rocks and Minerals. *American Geophysical Union*, (3), 189-204.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2008). Manual de geotermia (I). Madrid: Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE); Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Recuperado de: <http://www.idae.es/file/13351/download?token=-wNq3n8>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE]. (2011). Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020. Recuperado de: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf
- Ingebritsen, S. & Gleeson, T. (2017). Crustal permeability. *Hydrogeol J*. 25, 2221–2224.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2015). Anuario estadístico y geográfico de Hidalgo, Fisiografía. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/sedia/biblio/usieg/mapas/hgo_map.pdf
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2017), Geothermal Power: Technology Brief, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Jolie, E., Klinkmueller, M., Moeck, I., Bruh, D. (2016). Linking gas fluxes at Earth's surface with fracture zones in an active geothermal field. *Geology*, 44 (3), 187-190
- Llambías, J.E. (2001). Geología de los cuerpos ígneos. Instituto Superior de Correlación Geológica (INSUGEO). 2 (15). La Plata, Provincia de Buenos Aires, Argentina. 205-210p.
- Lesser-Carrillo, Luis E., Lesser-Illades, Juan M., Arellano-Islas, Santiago y González-Posadas, David. (2007). Balance y modelo del acuífero de Tulancingo, Hgo. Resumen ejecutivo. 2007, 1-22.
- Lesser-Carrillo, Luis E., Lesser-Illades, Juan M., Arellano-Islas, Santiago y González-Posadas, David. (2011). Balance hídrico y calidad del agua subterránea en el acuífero del Valle del Mezquital, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28(3), 2011, 323-336.

- Lanza, R., Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism and introduction for geologists*. Springer, 267 p
- López-Hernández, A. (2009). *Evolución volcánica del Complejo Tulancingo-Acozulco y su sistema Hidrotermal, estados de Hidalgo y Puebla, México.*, [Tesis de Doctorado]. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H., y Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acozulco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*, 38(3), 279–293.
- Manzella, A. 2017. Geothermal Energy. *The European Physical Journal Conferences*, 148 (12), 1-25.
- Marcano, A., Cartaya, S., Pacheco, H. & Méndez, W. (2012). Estimación de pesos ponderados de variables para la generación de mapas de susceptibilidad a través de la Evaluación Espacial Multicriterio (EEM). I Congreso Venezolano de Ciencia, Tecnología e Innovación en el Marco de la LOCTI y del PEII. Ministerio del Poder Popular para Ciencia, Tecnología e Industrias Intermedias, Caracas, Venezuela.
- Márquez, A., Verma, S., Anguita, F., Oyarzun, R., Brandle, J. (1999c). Tectonics and volcanism of Sierra Chichinautzin: extension at the front of the central transmexican volcanic belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 93, 125-150
- Martínez, J., Menéndez, I & Casas, D. (1986). *Formas Volcánicas: Las Calderas*. I.C.E. Universidad Politécnica de Las Palmas: Ciencias Básicas Biblioteca, 2-44.
- Milán, M., Yañez, I., Navarro, L., Verma, S. P., Carrasco, N. (1993). Geología y geoquímica de elementos mayores de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. *Geofísica Internacional*, 32(2), 261-276 p.
- Ministerio de energía. (sf). ¿Qué es la geotermia?. Recuperado de <https://www.energia.gob.cl/educacion/que-es-la-geotermia>
- Mochales-López, T. (2006). *Prospección magnética aplicada a la detección y caracterización de dolinas en el entorno de Zaragoza.*, [Tesis de maestría]. Universidad de Zaragoza. España.
- Moeck, I. S. (2014). Catalog of geothermal play types based on geologic controls. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, 867-882.
- Moeck, I. S., Dussel, M., Weber, J, Schintgen, T., & Wolfgramm, M. (2019). Geothermal play typing in Germany, case study Molasse Basin: a modern concept to categorise geothermal resources related to crustal permeability. *Netherlands Journal of Geosciences*, Volume 98, e14.
- Molavi, J. & McDaniel, J. (2016). A Review of the Benefits of Geothermal Heat Pump Systems in Retail Buildings. *Procedia Engineering*, 145, 1135-1143.

- Muhammad, A.M., Zhonghua, T., Dawood, A.S., & Bailey, E. (2015). Evaluation of local groundwater vulnerability based on DRASTIC index method in Lahore, Pakistan. *Geofísica Internacional*, 54(1),67-81.
- Nelson, S.A., Lighthart, A. (1997). Field excursion to the Sierra Las Navajas, Hidalgo, Mexico a Pleistocene peralkaline rhyolite complex with a large debris avalanche deposit. IICTI de la UAEH e IG de la UNAM. II Convención sobre la evolución geológica de México y recursos asociados. Pachuca, Hgo., México, libro-guía de las excursiones geológicas, Excursión 4, 89-96.
- Niederau, J., Wellmann, JF & Börsing, N. (2019). Analyzing the influence of correlation length in permeability on convective systems in heterogeneous aquifers using entropy production. *Geotherm Energy*. 35 (7), 5-7.
- Obiora, DN, Idike, JI, Oha, AI, Soronnadi-Ononiwu, CG, Okwesili, NA, & Ossai, MN (2018). Investigation of magnetic anomalies of Abakaliki area, Southeastern Nigeria, using high resolution aeromagnetic data. *Journal of Geology and Mining Research*, 10 (6), 57-71.
- Pacheco, F.A.L., Pires, L.M.G.R., Santos, R.M.B., & Sanches-Fernandes, L.F. (2015). Factor weighting in DRASTIC modeling. *Science of The Total Environment*, 505(15), 474-486.
- Palacio-Villa, M.A., Blessent, D., López-Sánchez, J., y Moreno, D. (2020). Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio. *Boletín de Geología*, 42(1), 101-118.
- Parri, R. Lazzeri, F. (2016). 19 - Larderello: 100 years of geothermal power plant evolution in Italy. *Geothermal Power Generation*, 19 (1), 537-590.
- Peiffer, L., Bernard-Romero, R., Mazot, Taran, Y., Guevara, M., Santoyo, E. (2014). Fluid geochemistry and soil gas fluxes (CO₂-CH₄-H₂S) at a promissory Hot Dry Rock Geothermal System: The Acoculco caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 284 (15), 122-137. <http://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.07.019>.
- Peredo-Mancilla, C.R. (2015). Análisis geológico-estructural de la Zona del Silencio, noreste de México a través de métodos geofísicos potenciales., [Tesis de maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí, México.
- Pérez-Corona, F.Y. (2011). Caracterización geofísica de ambientes cársticos, caso: Poljé de Joya de Luna, San Luis Potosí, México., [Tesis de Maestría]. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICIT).
- Pérez-Orrego, C.E. (2017). Modelamiento e interpretación de datos magnéticos y gravimétricos en la caracterización de un depósito tipo IOCG, Santiago de Chile., [Tesis de Maestría]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas: Universidad de Chile.
- Poletto, F., Farina, B. & Carcione, J.M., 2018, Sensitivity of seismic properties to temperature variations in a geothermal reservoir. *Geothermics*, 76(18). 149-163.

- Prol Ledesma, R.M., Cruz, J.L., Torres-Vera, M.A., Espinoza-Ojeda, O., Carrillo, Juan., & Membrillo-Abad, A. (2018). Heat flow map and geothermal resources in Mexico. *International e-journals of maps*, 2(2), 1-15.
- Prol-Ledesma, R.M., Morán-Zenteno, J. D. (2019). Heat flow and geothermal provinces in México. *Geothermics*, 78(1), 183-200.
- Ramón-Melo, ML. (2017). Análisis Geomorfológico del Cerro San Cristóbal y Cerro Cumbre Las Tres Marías: Pachuca de Soto, Hidalgo, México., [Tesis de Licenciatura]. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
- Reynolds, John M. (1997). An Introduction to Applied and Environmental Geophysics. *WILEY*, 806.
- Richarte, J.M., Peláez, J.A., Sánchez-Gómez, M., & Gil, A.J. (2007). Prospección gravimétrica en la terminación norte del frente montañoso de las Béticas: Jaén, España. *Revista Electrónica Universidad de Jaén*, 2, 1-9.
- Richter D. (2017). Cronoestratigrafía. En Gilbert AS (eds): *Enciclopedia de Geoarqueología*. Serie de la Enciclopedia de Ciencias de la Tierra. Springer, Dordrecht.
- Robilliard-Chiozza, Claudine. (2009). Generación de electricidad a partir de energía geotérmica. *Ingeniería Industrial*, (27), 185-205.
- Rondero-Guerrero, C. (2010). Cálculo promedio. El caso de la media aritmética. *Relime*. 13 (4-2): 387-408.
- Rybach, L. (2015). Classification of geothermal resources by potential. *Geothermal Energy Science*.13,13-17.
- Santoyo, E. & Barragán-Reyes, R.M. (2010). *Energía Geotérmica*. Recuperado de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/61_2/PDF/EnergiaGeotermica.pdf
- Sas, J., Osvald, M., Ramalho, E., & Matos, J. (2018). Combined study of mineral deposits and deep geothermal for energy production or urban heating – Comparison between the Portuguese (Neves-Corvo) and the Hungarian (Recsk) case studies. *Central European Geology*. 61(2). 118-135.
- Schumachera, S., Pieraub, R. & Wirth, W. (2020). Probability of success studies for geothermal projects in clastic reservoirs: From subsurface data to geological risk analysis. *Geothermics*. 83(20), 4.
- Secretaria de Energía [SENER]. (2015). Glosario De Términos Petroleros. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/8317/GLOSARIO_DE_TERMINOS_PETROLEROS_2015.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 1995, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Actopan, F14-D71, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.

- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2001, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Tasquillo, F14-C69, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2007, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Pachuca, F14-D81, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2009, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Mixquiahuala, F14-C89, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 2da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2009, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Huichapan, F14-C78, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1 da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2012, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera San Juan del Río, Querétaro, Hidalgo y Estado de México, F14-C77, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 2da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2016, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Tulancingo, F14-D82, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2019, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Sahagún, E14-B12, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, 2005, Geológico-Minera, Carta Geológico-Minera Huauchinango, F14-D83, escala (1: 50 000): Pachuca, Hidalgo, SGM, 1da ed.
- Servicio Geológico Mexicano, SGM, sf, Ficha para la toma de datos geomorfológicos, Método evaluación geológica de la construcción y ordenamiento territorial.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). sf. Léxico Estratigráfico: Soyatal. Recuperado de: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/Soyatal.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano (SGM). sf. Léxico Estratigráfico: El Doctor. Recuperado de: <http://mapserver.sgm.gob.mx/lexico/ElDoctor.pdf>
- Sircar, A. (2016). Geophysical Techniques for Geothermal Exploration. *IJARIE*.1(4). 55-59.
- Solana-López, J. (2010). Geología regional y petrogénesis del vulcanismo silíceo de la región circundante a la ciudad de Tulancingo, estado de Hidalgo.
- Sowizdżał, A., Hajto, M. & Hałaj, E. (2020). Thermal waters of central Poland: a case study from Mogilno-Lódź Trough, Poland. *Environ Earth Sci*. 79(112), 2.
- Spiridinov, A. I. (1981). Principios de la metodología de las investigaciones de campo y el mapeo geomorfológico, Universidad de la Habana, Facultad de Geografía, 574.
- Stober I. y Bucher K. 2013. Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development. New York: Springer-Verlag., 291 p.
- Tarbuck, E. J., Lutgens, F.K. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física, 8ed, Pearson, Madrid, España.

- Terry, R. & Young, K. (2015). Using Geothermal Play Types as an Analogue for Estimating Potential Resource Size. *GRC Transactions*, 39(1). 987-994.
- Torres, V., V. Arellano, R. M., Barragán, E., González, J. J., Herrera, Santoyo, E. & Venegas, S. (1993). Geotermia en México, México, Pro grama Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM, 161 p.
- Valenta, J. (2015). Introduction to Geophysics – Lecture Notes. Recuperado de http://www.geology.cz/projekt681900/english/learning-resources/Geophysics_lecture_notes.pdf
- Vergara-Hernández, A. (sf). *El arte rupestre en el estado de Hidalgo, patrimonio cultural que estamos perdiendo*. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/ida/n2/e1.html>
- Viggiano-Guerra, J.C., Flores-Armenta, M., y Ramírez-Silva, G.R. (2011). Evolución del sistema geotérmico Acoculco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, 24(1), 14-24.
- Wilmart, M., y Stimac, J. (2015). Power Density in Geothermal Fields. *Proceedings World Geothermal Congress*. Melbourne, Australia, 19-25.
- Zhdanov, M.S. (2015). Inverse Theory and Applications in Geophysics, en Zhdanov, M.S (2nd ed.), Forward and Inverse Problems in Science and Engineering: Department of Geology and Geophysics, University of Utah, Salt Lake City, UT, 84112, U.S.A. *Elsavier*. 3-31.
- Zobin, V. M. (2017). The Seismic Signals Associated with the Natural Seismicity of Geothermal Structures Within Volcanic Environment. *Introduction to Volcanic Seismology*. (3 Ed), 497-517.