



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

CENTRO DE GEOCIENCIAS

**ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE FRACTURAMIENTO EN EL
SUBSUELO DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE LOS HUMEROS:
ACTUALIZACIÓN AL MODELO 3D**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

PEDRO ALAN HERNÁNDEZ RIOS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GERARDO CARRASCO NÚÑEZ

MIEMBROS DEL COMITÉ:

DRA. SANDRA VEGA (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM JURIQUILLA)

DR. PABLO DÁVILA (DIVISIÓN DE GEOCIENCIAS APLICADAS, IPICYT)

DRA. DORA CARREÓN (CENTRO DE GEOCIENCIAS, UNAM JURIQUILLA)

DR. JOSÉ LUIS MACÍAS (INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM)

QUERÉTARO, MÉXICO, OCTUBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

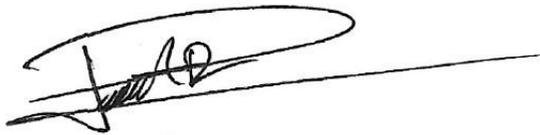
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DECLARATORIA DE ÉTICA

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized 'P' and 'A' followed by 'H. R.' and a long horizontal line extending to the right.

PEDRO ALAN HERNÁNDEZ RÍOS

Dedicatoria

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi madre. Siempre has sido mi motor y mi motivación, eres el Sol que me besa en la mejilla y la brisa que me abraza en la mañana. Tu bendición me protege todos los días de mi vida y me lleva por el camino del bien. Por eso te dedico todos y cada uno de mis logros en ofrenda por tu compañía, tu amor y tu paciencia madre mía, te amo hoy y por toda la vida.

ÍNDICE

Contenido

AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	13
1.1. Introducción	13
1.2. Ubicación del área de estudio	15
1.3. Planteamiento del problema y justificación	16
1.4. Objetivo	17
1.4.1. Objetivos específicos	17
1.5. Hipótesis	18
1.6. Antecedentes	18
CAPÍTULO 2. ENERGÍA GEOTÉRMICA: EXPLORACIÓN, MODELOS Y ENERGÍA ...	22
2.1 Exploración geotérmica	24
2.1.1. Estudios Geológicos	24
2.1.2. Estudios Geofísicos	24
2.1.3. Estudios Geoquímicos	25
2.2 Modelo geotérmico conceptual	25
2.2.1. Fuente de calor	26
2.2.2. Zona permeable o reservorio	26
2.2.3. Roca Sello	27
2.2.4. Recarga hidráulica	28
2.3. Energía geotérmica en el mundo	28
2.4. Energía geotérmica en México	29
2.5. Desarrollo sostenible y geotermia	31
CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO	33
3.1. El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)	33
3.2. Geología de la Caldera Los Humeros	33
3.2.1 Basamento Pre-Volcánico (unidad 9)	34
3.2.2 Vulcanismo Pre-Caldérico	35

3.2.3 Vulcanismo Caldérico	36
3.2.4 Vulcanismo Post-Caldérico (unidades 1 y 2)	38
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	40
4.1. Generación de la información	40
4.1.1. Recopilación de información y selección de muestras.....	40
4.1.2. Análisis del fracturamiento en muestras de lámina delgada.....	41
4.1.3. Digitalización de muestras.....	42
4.2. Procesamiento de la información.....	43
4.2.1. Medición de fracturas y cálculo de densidades de fracturamiento.....	43
4.2.2. Base de datos de fracturamiento.....	45
4.3. Construcción del modelo 3D.....	46
4.3.1. Consideraciones del software <i>Leapfrog Geo</i>	46
4.3.2. Modelado de una sección geológica del subsuelo.....	49
4.3.3. Modelado del fracturamiento.....	51
CAPÍTULO 5. RESULTADOS.....	54
5.1. Variación estratigráfica de la densidad de fracturamiento.....	55
5.2. Actualización del modelo tridimensional de la geología del subsuelo del Campo Geotérmico Los Humeros.....	80
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....	84
6.1. Correlación de las unidades litoestratigráfica del subsuelo del CGLH con el fracturamiento.....	84
6.2. Correlación de la densidad de fracturamiento con las facies de soldamiento en la Ignimbrita Xáltipan	88
6.3. Correlación del fracturamiento en el modelo 3D con la zona de alta permeabilidad	91
6.4. Análisis de la distribución de los miembros de la unidad 7.....	97
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	103
REFERENCIAS	105
ANEXO I.....	113
ANEXO II.....	121

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. A) Mapa simplificado mostrando la ubicación del Cinturón Volcánico Transmexicano. B) Imagen de Satélite (Google Maps) mostrando las principales estructuras que conforman el Complejo Volcánico de Los Humeros. Tomada de Carrasco-Núñez et al. (2017).	16
Figura 2. Modelo digital de elevación que muestra la ubicación de los pozos geotérmicos analizados en este trabajo (Modificada de Peña-Rodríguez, 2021).....	21
Figura 3. Gráfica que muestra las variaciones del gradiente geotérmico de la Tierra en función de la profundidad (Tarbuck & Lutgens, 2005).....	22
Figura 4. Central geotérmica de Larderello en la Toscana, Italia (Archivo histórico de Enel Green Power, 2020).....	23
Figura 5. Imagen que muestra los diferentes elementos que conforman un yacimiento geotérmico: 1) Fuente de calor; 2) Reservorio; 3) Roca sello; 4) Recarga Hidráulica. Modificado de SGC (2019).	26
Figura 6. Ubicación de las 5 plantas geotérmicas que operan en el país. Modificada de Cruz, (2016).	31
Figura 7 Mapa geológico simplificado de la caldera de Los Humeros. (Tomado de Peña-Rodríguez, 2021). Basamento Pre-volcánico- Pz/K: granodioritas y esquistos; J: calizas y lutitas; ;Tig: granito; Vulcanismo Pre-caldérico—Tpa: Lavas Teziutlán; Qr4-Qr3: domos riolíticos; Qb2, basaltos y andesitas basálticas; Qr: Domo riolítico C. Pizarro- Las Águilas; —Vulcanismo caldérico; QigX: Ignimbrita Xáltipan; Qr2:Diques riolíticos Los Potreros; Qtf: Toba Faby ; QigZ: Ignimbrita Zaragoza — Vulcanismo Post-caldérico — Qt2:Traquiandesitas Chicomiapa-Los Parajes; Qr1: domos riolíticos; Qta4:Traquiandesitas Maxtaloya; Qta2:Traquiandesitas Victoria; Qtab: Traquiandesitas basálticas Tepeyahualco; Qab1: Andesitas basálticas Atecax; Qab2: andesitas basálticas; Qta3: Traquiandesitas San Antonio-Las Chapas; Qtc: Miembro Cuicuiltic; Qb1: Lavas basálticas de olivino; Qt1: Traquitas El Pájaro; Qp: depósitos piroclásticos indiferenciados. (Modificado de Carrasco-Núñez et al., 2018).....	39
Figura 8. Ejemplo de una estimación visual de porcentajes para fracturas extrapolando los porcentajes de contenidos minerales. (Modificado de Arellano-Méndez et al., 2016).	42
Figura 9. Escala propuesta para la densidad de fracturamiento que considera el grado de fracturamiento (Intensidad) y la cantidad de fracturas en la muestra (frecuencia).	43
Figura 10. Ejemplos de imágenes digitales de láminas delgadas que muestran el proceso de identificación de fracturas en las muestras de esquirla para la obtención de la densidad de fracturamiento.....	45
Figura 11. Representación esquemática de la interpolación por funciones de base radial (FBR). Tomada de Rojo-García (2013).....	48
Figura 12. A) Captura de pantalla que muestra las diferentes capas que delimitan las unidades litológicas en el modelo estratigráfico para la zona de estudio. B) Corte de la sección del campo geotérmico donde se pueden visualizar las superficies de contacto entre litologías. Escala vertical x1.....	50

Figura 13. Generación del modelo geológico con el software Leapfrog Geo. A) Captura de pantalla que muestra los pasos para la creación de los volúmenes entre capas de contacto pertenecientes a las unidades litológicas. En el árbol de proyectos se selecciona la pestaña Cronología de superficies y posteriormente se acomodan las unidades en orden de emplazamiento. B) Sección estratigráfica Norte-Sur del área del campo geotérmico. Se observan los volúmenes litológicos.....	51
Figura 14. Procesamiento de los datos de densidad de fracturamiento. A) Pasos para la creación del modelo numérico en Leapfrog Geo. B) Vista tridimensional del mapa geológico de Los Humeros, mostrando la proyección de los pozos geotérmicos (líneas verticales) y los datos de fracturamiento (círculos de color), según la escala gráfica mostrada en la esquina superior derecha.....	53
Figura 15. Ubicación de los pozos en la sección geológica del modelo tridimensional.	54
Figura 16 Fotografía de la lámina delgada H5 - 1080 donde se observa una muestra de textura porfídica con fenocristales de plagioclasas, al centro de la imagen se observa cuarzo hidrotermal relleno una fractura.	59
Figura 17. Columna estratigráfica del pozo H5, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Gómez-Castellanos, 2016).	60
Figura 18. Columna estratigráfica del pozo H8, se muestra la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE. (La columna fue tomada de Carrasco-Núñez et al., 2008; 2017).....	62
Figura 19. Muestra de núcleo en lámina delgada del pozo H8 ubicada en el horizonte de los 1724 metros de profundidad y con valor de densidad de fracturamiento de 0.91. El corte muestra un muy alto fracturamiento a lo largo de toda la muestra con posible relación con fallamiento. Es posible observar evidencia de alteración mineral como calcita en la fractura que atraviesa la muestra de lado a lado además de epidota y clorita relleno la mayoría de las fracturas.....	63
Figura 20. Columna estratigráfica del pozo H10, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Peña-Rodríguez, 2018).....	65
Figura 21. Columna estratigráfica del pozo H19, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE. (La columna fue tomada de Carrasco-Núñez et al., 2008; 2017).....	67
Figura 22. Columna estratigráfica del pozo H20, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, se muestra también la pérdida de circulación en la columna intermedia y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Acosta, 2016).....	69
Figura 23. Columna estratigráfica del pozo H25, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por	

CFE, en particular a 1800 m de profundidad. (La columna fue tomada de Galván-Anderson, 2017).	71
Figura 24. Columna estratigráfica del pozo H26, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Fernández-Maya, 2017).	73
Figura 25. Columna estratigráfica del pozo H42, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Del Pilar, 2015).	75
Figura 26. Columna estratigráfica del pozo H55, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica fueron tomadas de Carrasco-Núñez et al., 2016).	77
Figura 27. Columna estratigráfica del pozo H63, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, se muestra también la pérdida de circulación en la columna intermedia y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Machorro-Bretón, 2018).	79
Figura 28. Bloque tridimensional mostrando la configuración geológica de la zona occidental de la caldera de Los Humeros modelada con la herramienta Leapfrog Geo, que incluye las unidades y los miembros propuestos por Peña-Rodríguez (2021). Ver Tabla 2 para la identificación de cada uno de los miembros y unidades litoestratigráficas mostrados en la leyenda.	81
Figura 29. Interpolación de los datos de densidad de fracturamiento en el modelo 3D del subsuelo. Se destaca la mayor proporción de datos (DF) con valores entre 0.2 y 0.4 (en color verde), que corresponden a zonas de fracturamiento definido como bajo-intermedio.....	83
Figura 30. Perfil que muestra las columnas litoestratigráficas de los pozos H63, H20 y H25, ubicados en la dirección NW – SE, mostrando las variaciones verticales y laterales de la densidad de fracturamiento de acuerdo con la estratigrafía propuesta por Peña-Rodríguez (2021).	86
Figura 31. Perfil que muestra las columnas litoestratigráficas de los pozos H63, H10 y H26, ubicados en la dirección NW – SE, mostrando las variaciones verticales y laterales de la densidad de fracturamiento de acuerdo con la estratigrafía propuesta por Peña-Rodríguez (2021).	87
Figura 32. Variación vertical de la densidad de fracturamiento en la unidad 5 perteneciente a la Ignimbrita Xáltipan en los pozos H26 y H52. Modificada de Cavazos-Álvarez et al. (2020).	89
Figura 33. Visualización 3D de las zonas superpuestas de fracturamiento y alta permeabilidades reportadas. A) Vista superior o en planta de la zona modelada. B) Perfil EW, con vista desde el norte en dirección sur. C) Perfil SN, con vista desde el este. D) Vista inferior. E) Perfil WE, con vista desde el sur. F) Perfil NS, con vista desde el oeste.	92

Figura 34. Secciones que muestran la distribución general de las zonas de fracturamiento y de alta permeabilidad en las secciones reportadas dentro del reservorio. Modificado de Fernández-Maya (2021). Mapa mostrando la ubicación de las secciones y la distribución en planta de ambas zonas. a) Sección A-A', se muestra la concordancia entre los datos de densidad de fracturamiento y la zona de permeabilidad inferida con datos de CFE. b) Muestra la sección A-A' de la zona de permeabilidad modelada por Fernández-Maya (2021). c) Sección B-B', muestra la diferencia entre la zona de fracturamiento y la zona de permeabilidad inferida con datos de CFE. d) Muestra la sección B-B' con las zonas de permeabilidad modeladas por Fernández-Maya (2021).	93
Figura 35. Sección que muestra un perfil del campo con dirección W-E, donde se puede ver la correlación entre la zona de fracturamiento y la zona de permeabilidad.	94
Figura 36. Vista en planta del modelo digital que muestra el área de concordancia entre las zonas de interpolación, que pueden interpretarse como posibles zonas de permeabilidad dominadas por fracturamiento.	96
Figura 37. Diagramas de secciones en 3D que muestran la cronología de la distribución interpretada a partir de las unidades y miembros litoestratigráficos principales pertenecientes a la unidad 7 del grupo precladérico. Visualización modelada en Leapfrog Geo a partir de los registros de pozo. A) Unidad 9, unidad 8 y zona de alteración; B) Miembro 7.A.1; C) Miembro 7.A.2; D) Miembro 7.B.1; E) Miembro 7.B.2; F) Miembro 7.B.3.	98
Figura 38. Corte en la sección A-A' en dirección NO-SE del modelado 3D del campo geotérmico, se resalta la distribución del miembro 7.A.2 y se observan los mayores espesores en la sección noroccidental del campo con reducción de su espesor en dirección sureste.	100
Figura 39. Posible ubicación de las fuentes eruptivos de los flujos andesíticos de la unidad 7 a partir de la interpretación del modelo tridimensional. Los miembros 7.B.1 y 7.B.2 muestran dos posibles fuentes ya que es difícil determinar sólo una a partir de los datos analizados.	102

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Capacidad geotermoeléctrica instalada (IRENA, 2022).	30
Tabla 2. Columna estratigráfica de la caldera de Los Humeros, mostrando la división de los grupos, unidades y miembros que la integran (Tomada de Peña-Rodríguez, 2021).	34
Tabla 3. Ejemplo de los datos de densidad de fracturamiento preparados para su importación en Leapfrog Geo. Los datos ordenados en columnas contienen el identificador del pozo (hole id), las coordenadas espaciales X Y Z y finalmente el dato que indica la densidad de fracturamiento en la muestra.	52
Tabla 4. Resultados de las densidades de fracturamiento calculadas (DF) para muestras de los pozos H5, H8, H10, H19, H20, H25 y H26, se resaltan en color beige las muestras provenientes de núcleo y se indican con una "x" las zonas de fracturamiento inferido (FI). También se señala la unidad-miembro (U-M) a la que pertenece cada muestra en la estratigrafía mostrados en la tabla 2.	56

Tabla 5. Resultados de las densidades de fracturamiento calculadas (DF) para muestras de los pozos H42, H43, H50, H52, H55, H59 y H63, se resaltan en color beige las muestras provenientes de núcleo y se indican con una “x” las zonas de fracturamiento inferido (FI). También se señala la unidad-miembro (U-M) a la que pertenece cada muestra en la estratigrafía mostrados en la tabla 2. 57

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Gerardo Carrasco Núñez, por el apoyo a lo largo de este proyecto, por la confianza que me brindo desde el inicio, por el conocimiento transmitido y por toda la ayuda que he recibido dentro de mi formación. Sin todas las correcciones, consejos y la guía por el mundo académico nada de esto hubiera sido posible.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca que me fue otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

A los proyectos PAPIIT IN109220 y IN108923 (UNAM-DGAPA), por el apoyo económico otorgado para la conclusión de esta tesis.

A la Comisión Federal de Electricidad (CFE), por facilitar las muestras de esquilas para la realización de los análisis de los distintos pozos geotérmicos.

A Seequent by Bentley por la licencia de Leapfrog Geo proporcionada al Centro de Geociencias de la UNAM.

Al M.C. Javier Hernández, gracias por los consejos, por compartir tus conocimientos, la experiencia y sobre todo la paciencia al resolver mis dudas y por todo el apoyo durante mi estancia en el laboratorio.

Al M.C. Francisco Omail Fernández por todo el apoyo al iniciarme dentro del software Leapfrog, gracias por el acompañamiento y por resolver mis dudas cuando hacía falta.

Al Dr. Uwe Martens por los consejos en materia metodológica, las ideas, revisiones y por permitirme usar instrumentación para fines prácticos de este proyecto.

Al Dr. Jaime Cavazos por despejar mis dudas en el camino, por invitarme a las salidas a campo, de verdad me ayudaron muchísimo, y gracias por las interesantes charlas que siempre compartimos.

A los revisores y miembros del jurado evaluador, Dra. Sandra Vega, Dr. Pablo Dávila, Dra. Dora Carreón y Dr. José Luis Macías, por tomarse el tiempo de revisar este proyecto de tesis, por los valiosos comentarios y por las críticas constructivas para el mejoramiento de este trabajo.

Al Posgrado en Ciencias de La Tierra y a la Secretaría Administrativa por su apoyo en la facilitación de todos los trámites a lo largo de mi estancia en el programa.

Al Centro de Geociencias (CEGEO) y a todo el personal académico y administrativo que lo conforma ya que sin todos ustedes el Centro no sería ese lugar lleno de experiencia y conocimiento.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi nueva alma máter y de la que siempre portaré orgulloso el escudo de esta maravillosa casa de estudios.

A mis viejos y nuevos amigos, compañeros y colegas del posgrado y a todas las personas que hicieron de este viaje algo increíble: Mariana, Augusto, Sofía, Jorge, Andrés, Elisa, Oscar, Mariana, Israel, Sergio y Antonio.

A Junuen Vázquez, que con mucho cariño me brindó su apoyo, compañía y motivación durante esta importante etapa de mi vida.

Y un agradecimiento muy especial a mis padres, por su apoyo siempre incondicional, mi madre Yesenia y a mi padre Pedro por animarme siempre a perseguir mis sueños, todos mis logros van siempre dedicados a ustedes con todo el corazón y todo el agradecimiento del mundo.

RESUMEN

La permeabilidad es una propiedad fundamental dentro de un reservorio geotérmico, por su importancia en el transporte de fluidos hidrotermales. Esta propiedad está dominada por las características físicas de las rocas presentes en el yacimiento. En los sistemas geotérmicos la permeabilidad se ve afectada por múltiples factores, tales como fracturamiento, porosidad, capacidad de lixiviación y mineralización secundaria entre otros, lo que dificulta la medición precisa de este parámetro. De estos, el fracturamiento determina las condiciones de transporte del fluido geotérmico y, por ello, resulta de gran interés la caracterización de su distribución en el subsuelo.

En este trabajo se han identificado intervalos de fracturamiento en el subsuelo del Campo Geotérmico de Los Humeros, mediante una nueva metodología propuesta a partir de la determinación de la densidad de fracturamiento obtenida como resultado del análisis y procesamiento digital de 485 muestras de lámina delgada que fueron extraídas de núcleos y esquirlas de roca provenientes del subsuelo. Esta información se ha usado para delimitar, mediante la interpolación de los datos, las zonas dominadas por microfracturas que se puedan correlacionar con la permeabilidad dentro del reservorio.

Los resultados engloban la visualización de la variación vertical del fracturamiento a lo largo de las secuencias estratigráficas de cada pozo. Además, se incluye la realización del modelado tridimensional de una sección del campo geotérmico, construido a partir de la estratigrafía actualizada del subsuelo y apoyándose en el modelo previo de la caldera. El modelo construido, mediante el software *Leapfrog Geo*, incluye una zona de fracturamiento interpolada a partir de las densidades de fracturamiento. A pesar de ser calculadas como un parámetro unidimensional éstas pueden ser consideradas como un buen indicador de esta zona de fracturamiento, la cual muestra en términos generales una buena correlación con las zonas de alta permeabilidad previamente inferidas, corroborando la utilidad de incluir esta metodología en la evaluación de las condiciones de permeabilidad por fracturamiento para la caracterización de un yacimiento geotérmico.

Palabras clave: Campo geotérmico, permeabilidad, fracturamiento, microfracturas, modelado 3D, Los Humeros.

ABSTRACT

Permeability is a fundamental property within a geothermal reservoir, due to its importance in the transport of hydrothermal fluids. This property is dominated by the physical characteristics of the rocks present in the reservoir. In geothermal systems, permeability is affected by multiple factors, such as fractures, porosity, leaching capacity and secondary mineralization among others, which makes it difficult to accurately measure this parameter. Among these, fracturing determines the transport conditions of geothermal fluids and, therefore, the characterization of its distribution in the subsurface is of great interest.

The present thesis work has identified and classified the microfracturing in the subsoil of the Los Humeros geothermal field, through a new proposed methodology from the determination of the fracture density obtained as a result of the analysis and digital processing of 485 thin sections extracted from the wells rock's core and chip samples. This information has been used to delimit by the interpolation of the data, the zones dominated by microfractures that correlate with the overall permeability within the reservoir.

Results show the vertical variation of the fracturing along the stratigraphic sequences of each well and the realization of the three-dimensional modeling of a section of the geothermal field, built from the updated stratigraphy of the subsoil and based on the previous model of the caldera. The model is built using Leapfrog Geo software, and it shows areas affected by fracturing. Nevertheless, they are calculated as unidimensional parameters, they can be considered as good indicators of those fracturing zones, which in general terms show a good correlation with the high permeability zones previously inferred. This corroborates the usefulness of using this methodology in the evaluation of fracture permeability conditions that can be potentially favorable for the characterization of a geothermal reservoir.

In addition, correlations with results from other studies are discussed.

Key words: Geothermal field, microfractures, permeability, 3D modeling, Los Humeros.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

La geotermia es una importante fuente de energía renovable. Se trata de la energía almacenada en forma de calor debajo de la superficie de la corteza terrestre y que puede ser autosustentable en cuanto a sus procesos de extracción y abastecimiento, además de que no requiere de la quema de combustibles fósiles y, por lo tanto, no producen emisiones de gases de efecto invernadero. La energía generada por procesos geotérmicos a partir del calor extraído del interior de la Tierra puede ser aprovechado en diferentes usos, siendo la energía eléctrica el más importante. En los últimos años, esta energía ha tenido un crecimiento muy importante; en México, se cuenta con una capacidad instalada de 976 MW y a nivel mundial la capacidad total es de 15,644 MW (IRENA, 2022).

México se caracteriza por presentar un vulcanismo muy abundante con actividad reciente, lo que lo hace uno de los países con mayores recursos geotérmicos en el mundo. Esto se debe principalmente a que la extensa actividad volcánica está asociada a los procesos de subducción que se llevan a cabo en los límites de placa, localizados cerca de las costas del océano Pacífico, y también debido a la presencia de la cresta oceánica del Golfo de California, que incluye al sistema de fallas de San Andrés, en la zona noroeste del territorio nacional (Glowacka et al., 2005).

Actualmente, México cuenta con cinco campos geotérmicos en operación: Cerro Prieto (Baja California Norte), Tres Vírgenes (Baja California Sur), Domo San Pedro (Nayarit), Los Azufres (Michoacán) y Los Humeros (Puebla). El Campo Geotérmico de Los Humeros, donde se ubica el área de estudio del presente trabajo cuenta con una capacidad instalada de 95 MW, posee más de 60 pozos perforados a la fecha y está a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) desde el inicio de su exploración en la década de 1980 y el inicio de su explotación a principios de los 90's (Gutiérrez-Negrin, 2019). Al ser este campo uno de los tres principales productores de energía geotérmica del país, es necesario mantenerlo en constante evaluación pues su alto potencial térmico así lo amerita.

Algunas de las características más importantes con las que debe contar un campo geotérmico es un alto grado de porosidad y de fracturamiento que determinen las zonas permeables del

sistema. El fracturamiento con interconexiones efectivas permite a los fluidos atravesar el medio geológico con menor resistencia, por lo que una roca con un grado de fracturamiento mayor favorecerá la explotación del fluido geotérmico y el implícito transporte de calor.

Durante varios años se han llevado a cabo estudios de distintas disciplinas en el Campo Geotérmico de Los Humeros (estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos), los cuales han permitido entender la evolución geológica de la caldera (Ferriz y Mahood, 1984; Carrasco-Núñez et al., 2018; entre otros) y el desarrollo del sistema geotérmico. Las investigaciones de geología estructural han determinado que el estilo de deformación del complejo volcánico está principalmente definido por la coexistencia de dos sistemas de fallas, uno de ellos corresponde al fallamiento asociado a la formación de las estructuras caldéricas, evidencia del colapso cuasi-circular, mientras que el otro corresponde a fallas regionales discontinuas y de diferentes orientaciones (Norini et al., 2015; 2019).

Esos sistemas estructurales son los responsables de generar un intenso fracturamiento de la roca a profundidad, favoreciendo la transmisión de los fluidos calentados por una fuente de calor. La identificación de ese fracturamiento a profundidad es de vital importancia para caracterizar el yacimiento geotérmico y entender cómo funciona a profundidad, además de intentar encontrar su asociación con las fallas que afloran en superficie. Es por esta razón que en este trabajo se propone un análisis cuantitativo del grado de fracturamiento en muestras de pozos del campo, acompañado de un modelado tridimensional que, en conjunto, permita visualizar y facilitar las comparaciones con otros parámetros físicos y, que a su vez sirvan para evaluar las condiciones de permeabilidad del yacimiento geotérmico de Los Humeros.

A partir del empleo de análisis petrográficos de las muestras disponibles, se determinaron las condiciones de fracturamiento en 14 de los pozos geotérmicos. Dichas muestras han sido caracterizadas con mayor en diferentes trabajos (Acosta-Azúa, 2017; Fernández-Maya, 2017; Del Pilar-Martínez, 2015; Huerta-Luna, 2018; Jáquez-Domínguez, 2018; Machorro-Bretón, 2018; Peña-Rodríguez, 2021). La integración de esta información facilitó la actualización de un modelo tridimensional de la caldera elaborado por Fernández-Maya (2021). Dicha actualización integra el grado de fracturamiento y su relación con las estructuras de falla para estudiar las características estructurales y de permeabilidad del Campo Geotérmico de Los Humeros. El modelo del campo en su versión actualizada puede ser también de gran apoyo

para identificar y localizar nuevas zonas de alta permeabilidad con potencial geotérmico, por la relación que ésta posee con el fracturamiento del subsuelo.

Se considera que la estrategia metodológica propuesta para este trabajo de tesis puede ser aplicada a otros campos o prospectos geotérmicos, para analizar los sistemas de fracturamiento en el subsuelo y evaluar si se presentan condiciones favorables para el desarrollo del sistema geotérmico.

1.2. Ubicación del área de estudio

El Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH) está ubicado en el noreste del estado de Puebla, en la zona oriental del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y, en el límite que separa los estados de Puebla y Veracruz. La parte central del CGLH tiene las siguientes coordenadas: 19.65 N y -97.43° O (Figura 1). El campo se encuentra dentro de un complejo volcánico de tipo caldérico conformado por la caldera Los Humeros, una caldera irregular de dimensiones 18 x 19 km, la cual cuenta a su vez con una caldera anidada de 9 km de diámetro en su interior, conocida como la caldera de Los Potreros. En el interior de ésta última se han perforado más de 60 pozos que combinan entre pozos productores, inyectoros y de exploración (Carrasco-Núñez et al., 2017).

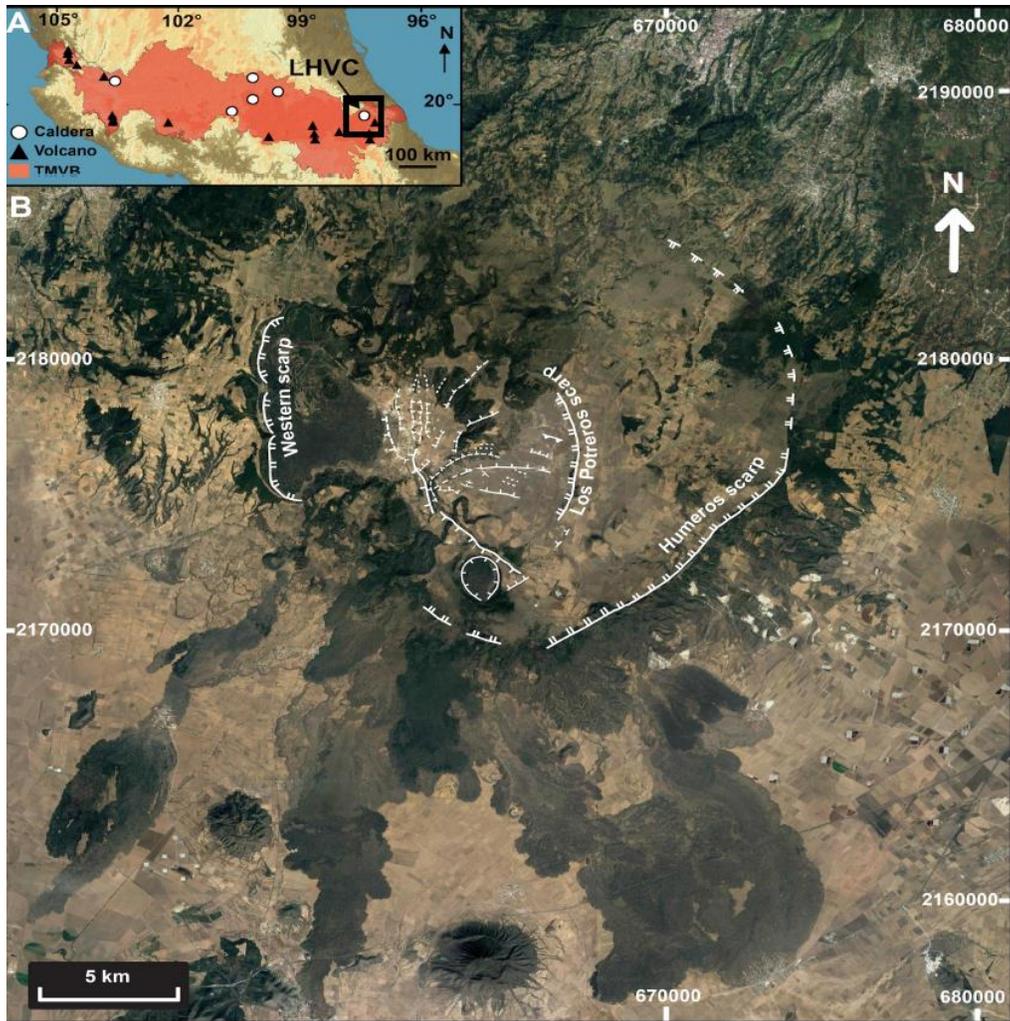


Figura 1. A) Mapa simplificado mostrando la ubicación del Cinturón Volcánico Transmexicano. B) Imagen de Satélite (Google Maps) mostrando las principales estructuras que conforman el Complejo Volcánico de Los Hornos. Tomada de Carrasco-Núñez et al. (2017).

1.3. Planteamiento del problema y justificación

Una caracterización adecuada del fracturamiento en el subsuelo de cualquier campo geotérmico es necesaria para entender las condiciones de permeabilidad de sus unidades litológicas. A pesar de los múltiples y diversos trabajos realizados en el CGLH, existen aún muchas interrogantes acerca del funcionamiento de los componentes que integran el sistema geotérmico asociado. Con la finalidad de entender con mayor precisión las condiciones en el subsuelo que favorecen la permeabilidad del reservorio asociado al CGLH se implementan diferentes estrategias metodológicas para definir las características de las estructuras y su

importancia en la permeabilidad del sistema. El presente trabajo se enfoca en analizar las características del fracturamiento a profundidad y su integración con otros parámetros, para la actualización de un modelo tridimensional geotérmico para el CGLH, que facilite la visualización y correlación de estos. Se propone que en dicho modelo se puedan mostrar las condiciones estructurales y su relación con el fracturamiento reportado en las columnas litoestratigráficas del campo, para entender cómo funciona el sistema geotérmico y así evaluar su viabilidad en la planeación de nuevas perforaciones de pozos.

1.4. Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización de las condiciones de fracturamiento del subsuelo del Campo Geotérmico de Los Humeros con información de muestras provenientes de 14 pozos geotérmicos perforados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Con la metodología propuesta, mediante el estudio de las esquirlas y núcleos disponibles, es posible identificar el grado de fracturamiento y asignarle un valor cuantitativo, generando así un índice de fractura que considera la densidad de fracturamiento en las muestras. Con esta información es posible efectuar correlaciones entre las nuevas unidades y miembros litoestratigráficos del subsuelo propuestos, así como con diversos parámetros físicos que sirvan para actualizar el modelo tridimensional, el cual puede facilitar la visualización y comparación con otros rasgos físicos que coadyuven en la identificación de zonas con fracturamiento en el subsuelo, lo que puede ser de utilidad para determinar zonas de permeabilidad.

1.4.1. Objetivos específicos

- Recopilar y analizar la información petrográfica de las muestras de pozos que aporten datos acerca de su grado de fracturamiento.
- Definir una escala de fracturamiento fácilmente identificable a partir de las características de las muestras de roca.

- Identificar y clasificar el fracturamiento presente en muestras de esquirlas y núcleos procedentes de 14 pozos del campo geotérmico.
- Calcular la densidad de fracturamiento en muestras de lámina delgada y usarla como un indicador cuantitativo.
- Elaborar un acervo de imágenes digitales mediante el escaneo de las muestras disponibles de láminas delgadas.
- Comparar los datos de fracturamiento con la información disponible y elaborar una base de datos que incluya la magnitud normalizada del fracturamiento presente en las muestras.
- Modelar la distribución de la densidad de fracturamiento y su correlación con parámetros físicos y geológicos, para la identificación de posibles zonas de fracturamiento a partir de los datos obtenidos, mediante el empleo del software *Leapfrog Geo*.
- Correlacionar los datos de fracturamiento con las distintas unidades y miembros litoestratigráficos del subsuelo.

1.5. Hipótesis

El fracturamiento es un parámetro significativo para evaluar la permeabilidad de un sistema geotérmico. En las rocas del subsuelo del Campo Geotérmico de Los Humeros puede ser cuantificado a partir de muestras de lámina delgada, tomando en cuenta el cálculo de densidad de fracturamiento como el parámetro de referencia. Con estos datos es posible determinar el grado de fracturamiento presente en las unidades estratigráficas del campo a través de la interpolación y visualización en un modelo tridimensional. Los resultados pueden proporcionar una aproximación indicativa sobre las condiciones de permeabilidad y los patrones estructurales del subsuelo.

1.6. Antecedentes

A partir de la década de los 70's, la exploración geotérmica comenzó un ascenso importante dentro del abanico del abastecimiento energético del territorio mexicano. Actualmente existen cinco plantas de energía geotérmica en el país, entre ellas se encuentra el CGLH

ubicado en el estado de Puebla, el cual a lo largo de su historia ha sido investigado mediante disciplinas y técnicas diversas. Los estudios han arrojado resultados sobre sus características geológicas, geoquímicas y geofísicas, indispensables para un aprovechamiento eficiente del recurso geotérmico.

La zona del Campo Geotérmico de los Humeros tuvo sus primeros estudios de exploración en la década de los 70's por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Estos estudios tuvieron como principal objetivo el localizar e identificar las manifestaciones termales que mostraran la presencia de recursos hidrotermales importantes. Algunos de estos primeros trabajos incluyen la cartografía del lugar, la estratigrafía local en detalle y descripción del posible potencial geotérmico (Yáñez y García, 1982).

Mediante la perforación de los primeros pozos exploratorios ha sido posible el análisis de información detallada que ayuda a comprender la geología del subsuelo. La primera base de datos, con información que estableciera la temporalidad de los eventos eruptivos en el campo, fue realizada por Ferriz y Mahood (1984). Posteriormente, se realizaron varios estudios geoquímicos en el área (Verma, 1984; 1985; 1986), así como trabajos sobre geología y estratigrafía de la superficie (Ferriz y Mahood, 1985, 1987; López-Hernández, 1995; Carrasco-Núñez y Branney, 2005; Willcox, 2011; Carrasco-Núñez et al., 2012; Dávila y Carrasco-Núñez, 2014; Norini et al., 2015 y Carrasco-Núñez et al., 2015).

Estudios más recientes sobre la caracterización de pozos se han realizado en el marco del Proyecto CeMIEGeo (Particularmente en el proyecto P05) y del consorcio GEMEX (Proyecto 4.5) a partir de varias tesis de licenciatura y de posgrado. Estos trabajos se han enfocado en análisis geoquímicos y petrográficos, con el fin de correlacionar la estratigrafía del subsuelo con la geología superficial (Gómez-Castellanos, 2016; Carrasco-Núñez et al., 2008; Peña-Rodríguez, 2018; Acosta-Azúa, 2016; Fernández-Maya, 2017; Del Pilar-Martínez, 2015; Huerta-Luna, 2018; Jáquez-Domínguez, 2018; Machorro-Bretón, 2018). Asimismo, Carrasco-Núñez et al. (2017) presentan una correlación estratigráfica de pozos seleccionados en el campo.

En cuanto a los antecedentes sobre un modelo conceptual para el campo geotérmico, Verma (1985) propone la existencia de una cámara magmática somera que funcionaría como la principal fuente de calor del sistema geotérmico, ubicada a unos 5 km de profundidad y

conectada hacia el sistema geotérmico más somero. A lo largo de 25 años el modelo conceptual ha evolucionado gracias al progresivo entendimiento del campo, varios autores han desarrollado diversas propuestas (Viggiano y Robles, 1988; Prol-Ledesma, 1998; Arellano et al., 1999, 2000, 2003; Cedillo, 2000; García-Gutiérrez, 2009; Gutiérrez-Negrín e Izquierda-Montalvo, 2010). El modelo conceptual más reciente propone un complejo sistema de pequeños conductos magmáticos alojados por debajo de la caldera y que alimentan el vulcanismo post-cálderico de Los Humeros (Lucci et al., 2020).

Existen hasta ahora aportaciones importantes de modelos geológicos tridimensionales, como el de Calcagno et al. (2018) un modelo que integra mapas geológicos, secciones transversales y registros de pozos, el cual ha servido como un marco de referencia en investigaciones posteriores que involucran el flujo de calor y el transporte de los fluidos geotérmicos. Adicionalmente, se cuenta también con otro modelo 3D de la Caldera de Los Humeros desarrollado por Fernández-Maya (2021), este modelo muestra un amplio panorama de la geología y del sistema geotérmico-magmático. Este modelo permite visualizar la configuración geológica del subsuelo gracias a los datos recopilados de una gran variedad de trabajos previos, de esta forma el modelo funge como un integrador de la información geofísica y geológica disponible hasta ese momento.

Para el presente trabajo se ha contado con muestras de esquirlas y núcleos en lámina delgada, de 14 pozos geotérmicos proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad. Los pozos se localizan dentro de la caldera de Los Potreros (Figura 2) y se distribuyen de la siguiente forma: en el sector norte se encuentran a los pozos H20 y H55; en el sector noroeste los pozos H43, H52, H59 y H63; en el sector centro-occidental alberga los pozos H5, H8, H10, H19 y H26; en el sector oriental se encuentra el pozo H25 y en el sector sur los pozos H42 y H50.

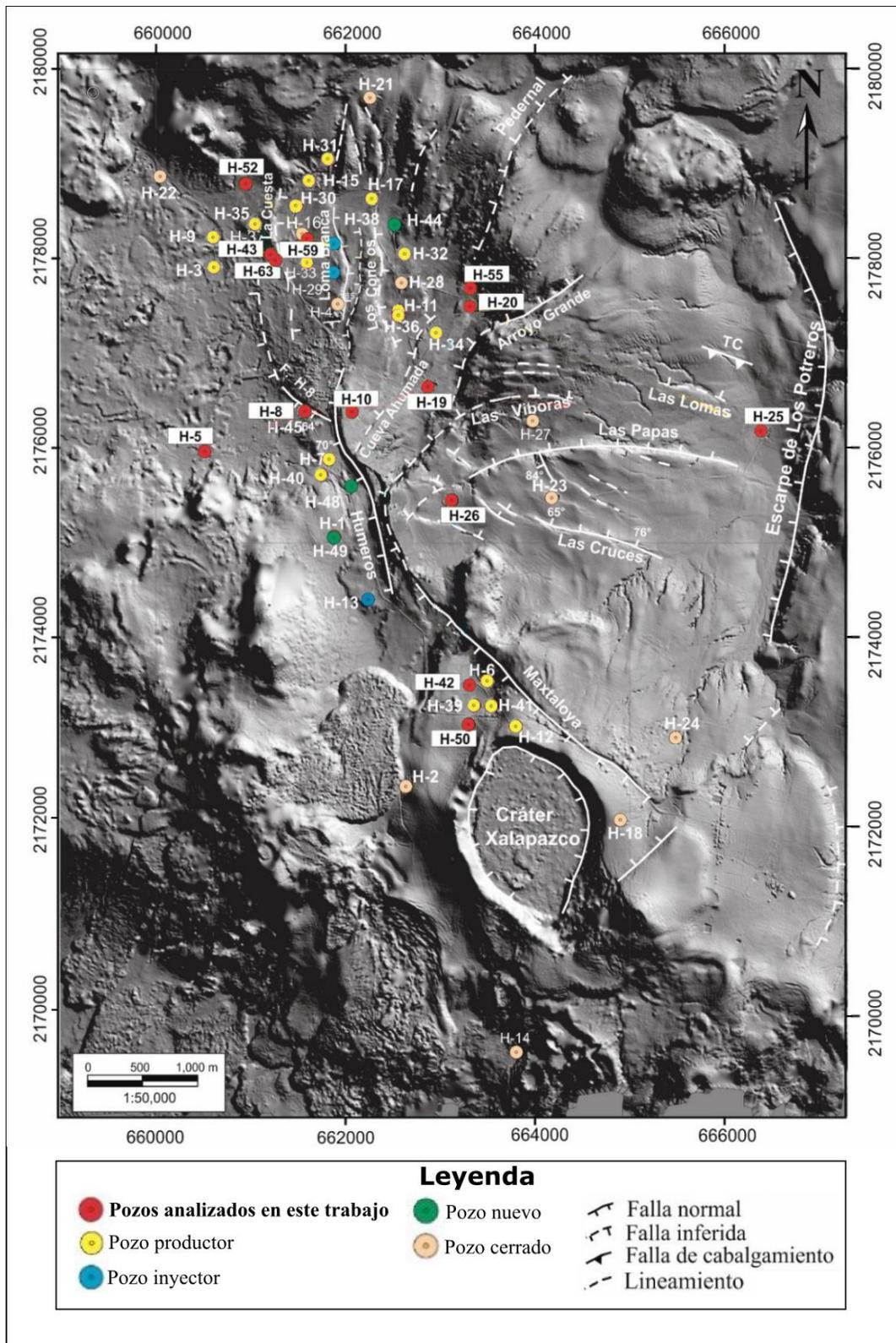


Figura 2. Modelo digital de elevación que muestra la ubicación de los pozos geotérmicos analizados en este trabajo (Modificada de Peña-Rodríguez, 2021).

CAPÍTULO 2. ENERGÍA GEOTÉRMICA: EXPLORACIÓN, MODELOS Y ENERGÍA

La Tierra, como un sistema dinámico convectivo, posee una inconmensurable fuente de calor en su interior, este flujo permanente de energía tiene sus orígenes en el calor residual que existe desde su formación, hace más de 4,500 millones de años, a causa de la fricción y el efecto gravitatorio creado por la acreción de material rocoso en el espacio. Adicionalmente se encuentra el calor generado por el decaimiento radiactivo de elementos ubicados en la corteza de nuestro planeta, diversos elementos químicos inestables llamados isótopos buscan el equilibrio energético transformándose en nuevos elementos (Shih, 1971). Es mediante este proceso que se liberan cantidades ingentes de energía en forma de calor, el cual es irradiado constantemente hacia la superficie calentando rocas, agua, gases y diversidad de materiales geológicos a su paso. De esta forma, la temperatura de la Tierra aumenta con la profundidad, este cambio gradual de temperatura se conoce como gradiente geotérmico y oscila en promedio a una tasa de 30°C por kilómetro en la corteza superior (Dickson & Fanelli, 2004) (Figura 3). El gradiente geotérmico puede variar dependiendo de la actividad geológica de la región, teniendo así gradientes más pronunciados en zonas donde la actividad volcánica está presente (Tarbuck & Lutgens, 2005).

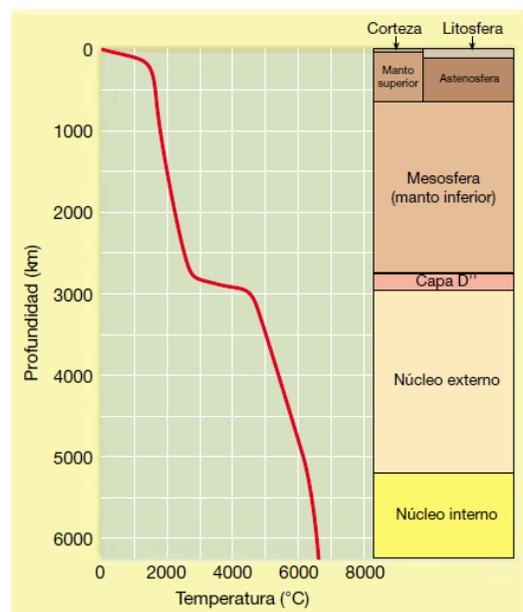


Figura 3. Gráfica que muestra las variaciones del gradiente geotérmico de la Tierra en función de la profundidad (Tarbuck & Lutgens, 2005).

Las rocas del interior de la Tierra pueden calentarse entre 700 – 1300 °C, y hacerse dúctiles o maleables hasta fundirse completamente y formar lo que se conoce como magma. Este fluido de roca fundida puede calentar otras rocas cercanas y/o acuíferos proximales creando así un flujo de calor hidrotermal que puede manifestarse en la superficie en forma de geiseres, manantiales o fumarolas (Llambías, 2001). Todas estas manifestaciones de calor son ejemplos de energía geotérmica, la cual puede ser usada de forma directa para la calefacción de espacios, aplicaciones de secado de alimentos o en invernaderos, y, por otro lado, el vapor de agua de alta temperatura puede usarse en la producción de energía eléctrica.

Tomando como referencia la definición propuesta por Santoyo-Gutiérrez y Torres-Alvarado (2010) la geotermia se define como el estudio y/o aprovechamiento de la energía térmica de la Tierra que, por procesos de transferencia de calor, es llevada desde el interior de la Tierra hasta la superficie. Esta energía ha sido aprovechada desde tiempos antiguos por el hombre para satisfacer sus necesidades, ya sea para calentarse, bañarse o cocinar alimentos. (Limberger et al., 2018).

La explotación comercial de la geotermia en la generación de electricidad inició en 1904, en el campo geotérmico de Larderello, Italia (Figura 4), cobrando mayor importancia hace cinco décadas. En los 70's, con el incremento en el costo de los combustibles fósiles, se le dio a la geotermia una importancia relevante, contribuyendo en parte a solucionar los requerimientos de energía de algunos países como Islandia (Kagel & Gawell, 2005).

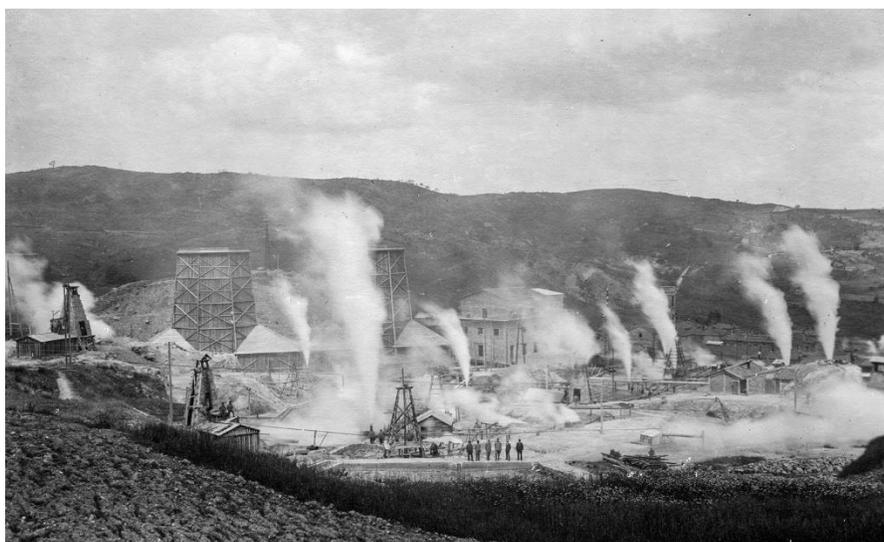


Figura 4. Central geotérmica de Larderello en la Toscana, Italia (Archivo histórico de Enel Green Power, 2020).

2.1 Exploración geotérmica

Las manifestaciones termales son el primer indicativo de la actividad geotérmica y sirven para establecer las posibles zonas de producción de esta fuente de energía. Cuando se identifica una región con actividad geotérmica, se utilizan diferentes técnicas de exploración para estimar la temperatura, volumen y permeabilidad del reservorio. Dichas técnicas también tienen el propósito de determinar las características del sistema, su tamaño, el tipo de fluidos presentes en el yacimiento, su composición química, entre otras características, esto con el fin de disminuir la incertidumbre y los riesgos asociados a la posible explotación del recurso (Prol-Ledesma, 2001). Una vez que se concluye la fase de exploración, se evalúa la factibilidad de continuar a fases posteriores de desarrollo como la perforación de pozos, apoyándose en la información recabada en la fase exploratoria.

En la fase de exploración se desarrollan tres tipos de estudios que ayudan a obtener la información del reservorio geotérmico:

2.1.1. Estudios Geológicos

El objetivo de los estudios geológicos es conocer las características de los tipos de roca que predominan en la zona en donde se ubica el sistema geotérmico, la cronología de eventos que les dieron origen y sus principales características estructurales. Durante estos estudios es necesario localizar las manifestaciones hidrotermales, hacer una descripción de sus características y su ubicación, describir las rocas que afloran y recolectar muestras. Deben elaborarse también mapas geológicos preliminares y ubicar los sitios con evidencias de alteración hidrotermal, comprobar si existen cuerpos de agua superficiales y cualquier otra información de carácter geológico que sea pertinente (Prol-Ledesma, 2001).

2.1.2. Estudios Geofísicos

Los estudios geofísicos utilizan técnicas y métodos directos e indirectos con el fin de revelar las variaciones en las características físicas de las rocas al entrar en contacto con los fluidos geotérmicos. (Barbier, 2002). Los parámetros físicos considerados en estos estudios pueden ser la temperatura, conductividad eléctrica, la velocidad de propagación de ondas elásticas, la densidad y susceptibilidad magnética. Conocer esta información permite, además, inferir propiedades relevantes de los fluidos y de las rocas que los contienen. De esta manera se

corroborar información proveniente de otros estudios y así se obtiene un mejor entendimiento del sistema geotérmico.

2.1.3. Estudios Geoquímicos

Los estudios de carácter geoquímico tienen por objetivo conocer las características químicas de los fluidos hidrotermales presentes en el yacimiento, así como de los procesos de alteración que se producen en las rocas. La información que se obtiene mediante esta etapa es de suma utilidad para determinar las temperaturas máximas, el tamaño del yacimiento y las características principales del fluido, así como su posible origen. De forma general, los estudios geoquímicos pueden proporcionar una muy buena idea del potencial térmico del reservorio. La comprensión de estas características es esencial para la explotación y desarrollo de recursos geotérmicos, así como del impacto ambiental que podría generar la explotación de éste (Anórsson et al., 1983).

2.2 Modelo geotérmico conceptual

El modelo conceptual es una interpretación de los componentes que integran el sistema geotérmico y se basa en la integración y análisis de los resultados provenientes de los estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos realizados. Este modelo se va actualizando a medida que se incorporan nuevos estudios. Un modelo conceptual propone el tamaño, extensión y rangos de profundidad del sistema geotérmico que se está estudiando, así como de los elementos fundamentales que lo conforman.

Un sistema geotérmico está constituido por cuatro elementos principales (Figura 5): 1- fuente de calor, normalmente una intrusión magmática en la corteza; 2- reservorio o yacimiento que funge como el receptor y almacenador de calor, formado de rocas permeables que interactúan con el fluido geotérmico; 3- cobertura impermeable sobre el yacimiento que impide la pérdida de calor del reservorio, típicamente se conoce como roca sello; y 4- recarga hidráulica que proporciona agua que al calentarse por la fuente de calor genera el vapor o fluido indispensable para el sistema geotérmico.

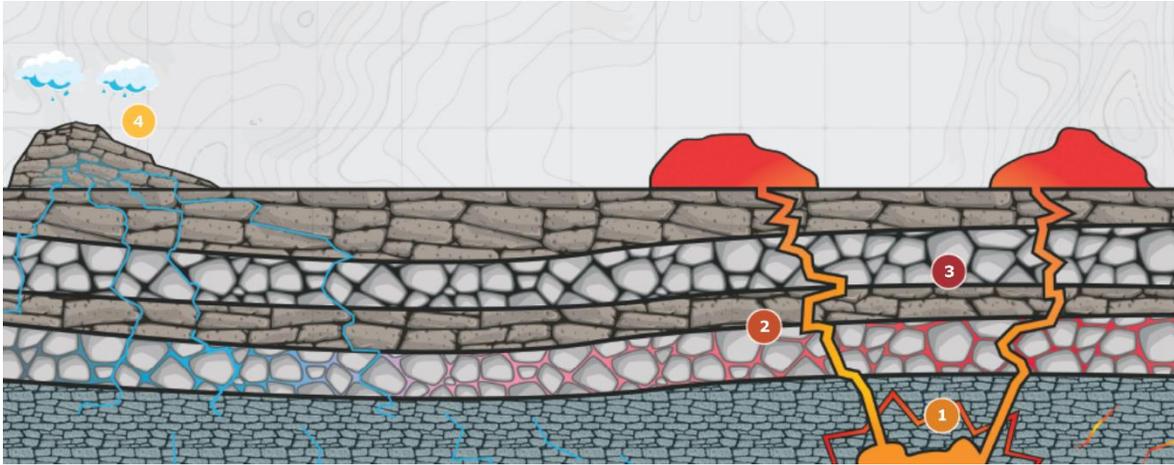


Figura 5. Imagen que muestra los diferentes elementos que conforman un yacimiento geotérmico: 1) Fuente de calor; 2) Reservorio; 3) Roca sello; 4) Recarga Hidráulica. Modificado de SGC (2019).

2.2.1. Fuente de calor

Se relaciona con la presencia de una intrusión magmática dentro de la corteza terrestre, normalmente este magma se acumula en un reservorio a una profundidad de entre 5 y 10 km bajo la superficie (Armstead, 1983; Dickson & Fanelli, 2005). Los campos geotérmicos “comerciales” se ubican en regiones donde la actividad volcánica ha ocurrido en el pasado o que se encuentra actualmente activa. Algunos de los campos activos se encuentran situados sobre volcanes o muy próximos a estos, mientras que otros no están directamente relacionados con centros de actividad volcánica reciente.

2.2.2. Zona permeable o reservorio

Un yacimiento geotérmico está conformado por rocas permeables, en la mayoría de los campos la permeabilidad está controlada por un sistema de fracturamiento penetrante o fracturas asociadas a zonas de falla, aunque recientemente se ha considerado también el papel que pueda jugar, de manera secundaria, la microporosidad de ciertas rocas volcánicas (Cid et al., 2021). En la zona donde se aloja el reservorio, el agua circula lentamente incrementando su temperatura. La circulación del fluido se da en zonas de alta permeabilidad, propiedad de la roca que permite la circulación a través de sus poros o fracturas interconectadas.

2.2.2.1 Fracturamiento

Este trabajo se enfoca en el estudio del fracturamiento como factor fundamental de la permeabilidad del subsuelo. A continuación, se define el concepto de fractura.

De acuerdo con varios autores y desde diferentes puntos de vista, se pueden dar distintas definiciones de fractura, desde el punto de vista de la geología estructural una fractura es definida como una discontinuidad causada por deformación frágil de la roca (Narr & Schechter, 2006). De esta forma, el fracturamiento en yacimientos naturalmente fracturados depende principalmente de los esfuerzos mecánicos a los que ha estado sometida la roca y de sus propiedades. Por lo tanto, los atributos relacionados al fracturamiento, tales como la apertura de fractura, tamaño, distribución, orientación, etc., estarán relacionados con el estado de esfuerzos, el tipo de comportamiento mecánico de las rocas (frágiles o dúctiles), las condiciones estructurales del sistema, la profundidad del yacimiento (sobrecarga), la litología, el espesor de los estratos, etc. (Van Golf-Racht, 1982).

Por definición -una fractura abierta puede o no estar alterada y/o mineralizada-. Es por esta razón que pueden tener un efecto positivo o negativo en la capacidad de permitir el flujo a través de la roca. En general, las fracturas y fallas son producto de la deformación frágil en cualquier tipo de roca y se relacionan con condiciones de esfuerzos cortantes, de tensión o de compresión (Romero-Miranda, 2011). Muchos sistemas geotérmicos presentan una combinación de distintas configuraciones estructurales, en lugar de una falla aislada con inclinaciones diversas, lo que puede resultar en un aumento de la permeabilidad del reservorio (Jentsch, 2021).

2.2.3. Roca Sello

La roca sello es un componente importante en cualquier sistema geotérmico porque impide el ascenso a la superficie de fluidos geotérmicos y mantiene la presión del sistema. Es una roca de muy baja o nula permeabilidad, como pueden ser depósitos arcillosos uniformes, rocas consolidadas sin fracturas, así como rocas piroclásticas emplazadas con altos grados de soldamiento durante su enfriamiento.

2.2.4. Recarga hidráulica

Un elemento adicional y de suma importancia presente en un sistema geotérmico es una fuente de recarga de fluido, el cual fungirá como el transportador del calor proveniente del subsuelo. Este fluido puede ser principalmente el agua de lluvia que se recarga desde la superficie de la Tierra y que se infiltra hasta profundidades donde se calienta por el contacto con rocas a altas temperaturas, de tal forma que vuelve a ascender a la superficie transportando parte de la energía presente en el interior (Llopis & Angulo, 2008).

El sistema geotérmico con el esquema presentado en la Figura 5 funciona de la siguiente manera: El agua meteórica que cae en las zonas altas de la topografía se infiltra a través de zonas permeables (recarga hidráulica) y se desplaza hasta cierta profundidad, en donde se encuentra con una fuente de calor y con las rocas permeables y de alta porosidad que constituyen el reservorio. En el reservorio, el agua se almacena gracias a la presencia de una capa impermeable que impide que el fluido escape (roca sello). De esta forma, el agua caliente circula por fallas y fracturas hasta ascender a la superficie.

2.3. Energía geotérmica en el mundo

El aprovechamiento del recurso geotérmico se ha ido incrementando debido a la demanda energética global. La energía geotérmica puede proporcionar energía de manera constante, a diferencia de otros tipos de energías renovables como la solar y la eólica. Algunas ventajas adicionales de la energía geotérmica son los altos factores de planta que posee este recurso y diferencias en cuanto al menor uso de superficie que se requiere para la producción de energía (Llopis & Angulo, 2008).

A pesar de ser una tecnología con más de 100 años de existencia desde su primera aplicación para la producción de energía eléctrica, su desarrollo ha sido bastante limitado en comparación con otras fuentes renovables. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA), esta fuente de energía se encuentra lejos de alcanzar el objetivo propuesto para el escenario de cero emisiones netas para 2050 (IEA, 2021), el cual requiere un crecimiento promedio anual del 13% en el periodo 2021-2030 y que corresponde a un incremento anual de la capacidad instalada de ~3.6GW.

La energía geotérmica permanece como una fuente de energía renovable en desarrollo, según datos de la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA, 2022) en 2021 contó con una potencia instalada a nivel mundial de 15,960 MW, representando un 0.5 % de la capacidad instalada en ese año.

En cuanto a la generación de energía eléctrica, los datos más recientes proporcionados por IRENA (2022) muestran que en 2021 se generaron cerca de 95 TWh de energía que equivalen al 1.27% de la producción total de energía renovable en este año. Por su parte, la IEA estima que la producción de energía geotérmica en 2022 fue de 104.6 TWh (IEA, 2022).

Las perspectivas a futuro indican que la capacidad instalada para el 2023 podría incrementarse hasta un 7% equivalente a 17.3 GW, donde Kenia, Turquía y Filipinas serían los principales protagonistas de este crecimiento. (IEA, 2020).

2.4. Energía geotérmica en México

Gracias a las condiciones geológicas del territorio nacional, México cuenta con un gran potencial en recursos geotérmicos, la mayoría de los aprovechamientos geotérmicos se localizan principalmente en la provincia del Cinturón Volcánico Transmexicano.

La primera perforación de carácter geotérmico en México se realizó en 1959, con el fin de aprovechar los fluidos hidrotermales en Pathé, municipio del estado de Hidalgo, donde se operó una planta con una potencia efectiva de 600 kW (Burgos & Arellano-Gómez, 1998). Hoy día los aprovechamientos no se encuentran limitados a la producción de energía eléctrica, también se han llevado a cabo diversos proyectos en el periodo 2014-2019 que involucran usos directos del recurso geotérmico (CemieGeo, 2019).

La geotermia representa actualmente sólo el 1.3% de la matriz de generación, con 4,243 GWh al cierre de 2021 (SENER, 2022) y el 1.1 % de la capacidad instalada con 976 MW (IRENA, 2022). Con esto, México posee la sexta posición en capacidad instalada de energía geotérmica (Tabla 1) después de Estados Unidos, Indonesia, Filipinas, Turquía y Nueva Zelanda, y sería capaz de utilizar su potencial de reservorio de alta temperatura para alcanzar hasta los 4.5 GW en 2030 (IRENA, 2015). De esta manera y atendiendo los compromisos

establecidos, para alcanzar en el 2024 una diversificación energética del 35% basada en energías limpias, se está impulsando a las tecnologías solares, eólicas y geotérmicas. En el contexto geo-energético, México cuenta ya con una capacidad cerca de los 1,000 MW para contribuir con energía libre de emisiones, ocupando en esta categoría el primer lugar en América Latina. (SENER, 2022).

Tabla 1 Capacidad geotermoeléctrica instalada (IRENA, 2022).

País	Capacidad Instalada (MW)	Capacidad Mundial Instalada de Energía Geotérmica %
U.S.A.	3,889	24.37
Indonesia	2,277	14.27
Filipinas	1,928	12.08
Turquía	1,676	10.50
Nueva Zelanda	1,273	7.98
México	976	6.12
Kenia	863	5.41

Actualmente el país cuenta con 5 campos geotérmicos en operación (Figura 6): Cerro Prieto en Baja California Norte, con una capacidad instalada de 570 MW, que es el campo más grande del país; Los Azufres en Michoacán, con 275 MW; Los Humeros, en el estado de Puebla, con 96 MW; Las Tres Vírgenes, con 10 MW en Baja California Sur y la planta Domo San Pedro en Nayarit, con una capacidad de 25 MW, siendo esta última la única planta que no está bajo operación de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los datos de potencia instalada fueron reportados por la Secretaría de Energía al cierre del año 2021 (SENER, 2022).



Figura 6. Ubicación de las 5 plantas geotérmicas que operan en el país. Modificada de Cruz, (2016).

Las perspectivas a futuro, de acuerdo con el Programa para el Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2022-2036, indican que para finales de 2030 se alcanzaría una capacidad instalada de 1,132 MW (SENER, 2022).

2.5. Desarrollo sostenible y geotermia

Desde un punto de vista económico y ambiental la geotermia es un recurso autóctono, por esta razón, con su aprovechamiento se reduce la dependencia a los combustibles fósiles lo que contribuye a la seguridad energética mundial. El factor de planta de la energía geotérmica es muy alto (~90%), a diferencia de otras tecnologías (DiPippo, 2012), lo que indica que el costo de este tipo de energía está incluso por debajo de otras fuentes de aprovechamiento energético.

De acuerdo con Guzmán (2011), la geotermia ofrece ventajas de carácter social y medioambiental, muy por encima de los combustibles fósiles y de muchas otras energías renovables. Es una fuente limpia de energía debido principalmente a sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero, su huella es relativamente pequeña sobre el uso de superficie y su bajo impacto global (siempre y cuando los procedimientos de perforación, reinyección y

la gestión de los fluidos residuales sean hechos de manera responsable). Al igual que otras tecnologías energéticas, los impactos sobre el medio ambiente relacionados con los proyectos geotérmicos deben ser estudiados y monitoreados para manejarse durante el desarrollo del proyecto para reducir los posibles efectos negativos que se pudieran generar sobre las comunidades y sobre los ecosistemas naturales. (Dolezal & Majano, 2013).

CAPÍTULO 3. MARCO GEOLÓGICO

3.1. El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM)

El Cinturón Volcánico Transmexicano es un arco continental, originado en el Neógeno y con una extensión de aproximadamente 1000 km, que va desde las costas del océano Pacífico hasta el Golfo de México (Ferrari et al., 1999; 2012). El CVTM es atribuido al proceso de subducción entre la placa de Cocos que subduce por debajo de la placa Norteamericana (Pardo y Suárez, 1993; 1995). Este arco volcánico posee un vulcanismo muy variado, que incluye estratovolcanes, calderas, domos y campos de vulcanismo monogenético. (Demant, 1978; Mooser, 1972). El CVTM está dividido en tres sectores principales, en función de su tipo de vulcanismo y de su composición, a saber: occidental, central y oriental (Ferrari et al., 1999).

El sector occidental del CVTM colinda con el límite sur de la Sierra Madre Occidental (SMO) donde el vulcanismo es de tipo bimodal, en esta zona se pueden encontrar estratovolcanes, domos y vulcanismo monogenético. El sector central del CVTM se encuentra entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Guerrero, la principal área de vulcanismo en la zona es el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, el cual está compuesto por numerosos centros monogenéticos y por pequeños volcanes tipo escudo, de composición basáltica-andesítica (Ferrari et al., 2000).

Finalmente, en el sector oriental del CVTM, que se extiende desde el sistema de fallas Taxco-Querétaro hasta la costa del estado de Veracruz, el vulcanismo emplazado es muy diverso e incluye grandes estratovolcanes, calderas, estructuras tipo mar y domos de composición intermedia-ácida, además de volcanes monogenéticos de composición básica, aunque en menor proporción a las diferentes secciones del CVTM. En los límites orientales se encuentra el Pico de Orizaba (Citlatépetl) y el volcán Cofre de Perote (Nauhcampatépetl), ubicado también al extremo sur de la Sierra Madre Oriental. Es en este sector del CVTM donde se ubica la Caldera de Los Humeros, principal objeto de estudio del presente trabajo.

3.2. Geología de la Caldera Los Humeros

La Caldera de Los Humeros posee una geología compleja que ha sido estudiada desde la década de los 70's, y reportada en diferentes artículos científicos, mapas, reportes técnicos

y tesis de todos los niveles. De acuerdo con Carrasco-Núñez et al. (2018) la geología de la caldera (Figura 7) se compone de cuatro grupos estratigráficos (Tabla 2), que muestran su evolución a través del tiempo geológico, y que son: el grupo IV que muestra el basamento pre-volcánico; el grupo III que conforma la formación pre-caldérica; el grupo II, que describe la formación de la caldera y, finalmente el grupo I que conforma el grupo post-caldérico. A continuación, se describen cada uno de los grupos, unidades y miembros.

Tabla 2. Columna estratigráfica de la caldera de Los Humeros, mostrando la división de los grupos, unidades y miembros que la integran (Tomada de Peña-Rodríguez, 2021).

Grupo	Unidad	Miembro	Descripción	
Grupo Post-Caldérico	Unidad 1		Depósitos de caída y paleosuelos indiferenciados	
	Unidad 2. Lavas Post-caldéricas	2.E	Basáltos de olivino de Cpx + (Opx)	
		2.D	Depósitos de pómez	
		2.C	Traquiandesitas de Cpx	
		2.B	Andesitas porfídicas de Cpx	
	2.A	Andesitas basálticas de Cpx +(Opx) + (Ol)		
Grupo Caldérico	Unidad 3		Ignimbrita Zaragoza	
	Unidad 4		Toba Faby	
	Unidad 5		Ignimbrita Xáltipan	
Grupo Pre-Caldérico	Unidad 6. Rocas riolíticas Pre-caldéricas	6.C	Riolitas bandeadas	
		6.B	Riolitas bandeadas de (biotita)	
		6.A	Riolitas perlíticas	
	Unidad 7. Lavas Pre-caldéricas	M.7.B	7.B.3	Andesitas porfídicas de (Cpx)
			7.B.2	Andesita porfídicas de Cpx
			7.B.1	Andesitas porfídicas
		M.7.A	7.A. 2	Andesitas porfídicas de Cpx
			7.A. 1	Andesitas basálticas de Cpx + Ol + (Opx)
	Unidad 8. Lavas Basales		Andesitas porfídicas de Cpx + (Hbl)	
			Andesitas basálticas de Cpx + (Ol)	
Basamento Pre-Volcánico	Unidad 9		Calizas metamorizadas y diques dioríticos	

3.2.1 Basamento Pre-Volcánico (unidad 9)

El basamento pre-volcánico está compuesto por un complejo cristalino del Paleozoico-Cretácico integrado por rocas intrusivas y metamórficas, conocido como el Macizo de Teziutlán; el cual está caracterizado por la presencia de granodioritas con plagioclasa y esquistos verdes con cuarzo y moscovita, además de feldespatos potásicos, biotita y

hornblenda (Quezadas-Flores, 1961). Los afloramientos del Macizo de Teziutlán han sido reconocidos al norte y al noreste de la caldera.

El basamento metamórfico se encuentra por debajo de una secuencia de rocas sedimentarias del Jurásico, las cuales comprenden una secuencia de lutitas y calizas fuertemente plegadas que pertenecen a la provincia de la Sierra Madre Oriental (Viniegra-Osorio, 1965). La secuencia de rocas sedimentarias están intrusionadas por diques detríticos y graníticos con una edad calculada por el método de K/Ar, de 14.5 a 31 Ma (Yáñez y García, 1982) y con el método U/Pb, de 15.1 Ma (Carrasco-Núñez et al., 2017b). Tanto las calizas metamorfoseadas, como los diques dioríticos integran la unidad 9 de la columna descrita por Peña-Rodríguez (2021), mostrado en la tabla 2.

3.2.2 Vulcanismo Pre-Caldérico

Este grupo describe la actividad volcánica previa a la formación del Campo Volcánico de Los Humeros (CVLH), y ha sido subdividido en 3 unidades (8, 7 y 6):

Vulcanismo pre-caldérico basal (unidad 8)

Esta unidad está conformada por una potente secuencia andesítica que puede separarse en diferentes miembros. En la base se presentan andesitas de hornblenda y basaltos con una distribución limitada, registrándose en una minoría de los pozos geotérmicos de la zona central de la caldera. La unidad 8 (Tabla 2) fue correlacionada geoquímicamente con el vulcanismo del Cerro Grande por el contenido de hornblenda, ubicado al oeste de la caldera y que fuera previamente estudiado por Gómez-Tuena y Carrasco-Núñez (2000), y fechado entre 8.5 y 11 Ma (Carrasco-Núñez et al., 1997).

Vulcanismo pre-caldérico intermedio (unidad 7)

Unidad compuesta principalmente por un potente paquete de lavas de composición intermedia, dominado por andesitas porfiríticas de piroxenos y con escasas andesitas basálticas en la parte basal (Carrasco-Núñez et al., 2017b). De acuerdo con López-Hernández (1995), este evento efusivo estaría compuesto por dos unidades, debido a la presencia de roca intensamente alterada que se intercala estos flujos andesíticos (Andesita Teziutlán (1.46-2.61

Ma) y Andesita Cuyoaco). Con base en los estudios geoquímicos, características petrográficas y posiciones estratigráficas, realizados por Peña-Rodríguez (2021) se ha propuesto que la unidad 7 se conforma por dos miembros principales (7.A y 7.B) que albergan en conjunto a 5 miembros secundarios (7.A.1-2 y 7.B.1-3), como se muestra en la tabla 2. El miembro 7.A, se compone por los submiembros 7.A.1 y 7.A.2. El miembro basal 7.A.1 se caracteriza por andesitas basálticas de clinopiroxenos, olivino y ortopiroxeno ocasional, mientras que el miembro 7.A.2 está conformado por andesitas porfídicas de clinopiroxenos. El miembro 7.B se divide en los submiembros 7.B.1, 7.B.2 y 7.B.3. El primer miembro se compone de andesitas porfídicas. El miembro intermedio, 7.B.2, es un paquete delgado de andesitas porfídicas de clinopiroxeno. Finalmente, en esta unidad se incluye al miembro 7.B.3, el cual representa la etapa final del vulcanismo efusivo pre-caldérico, compuesto por andesitas porfídicas con clinopiroxeno ocasional (Peña-Rodríguez, 2021).

Vulcanismo pre-caldérico superior (unidad 6)

De acuerdo con Carrasco-Núñez et al. (2018), el vulcanismo pre-caldérico involucra, además de flujos de lava, domos riolíticos que se han localizado al sur y al oeste de la caldera con edades de 693, 470 y 270 Ka, además de domos adicionales ubicados al noroeste de la caldera con edades de 155 y 270 Ka. Estos domos han sido agrupados como parte de la unidad 6 en la columna estratigráfica, y está integrada por tres miembros (6.A, 6.B y 6.C), los cuales fueron así definidos por sus características texturales, posición en los estratos y por sus características geoquímicas. El miembro 6.A está compuesto por riolitas esferulíticas y perlíticas. El miembro intermedio, denominado 6.B, está compuesto por riolitas bandeadas de biotita. El miembro 6.C también está compuesto por riolitas bandeadas, se encuentra intercalado con el miembro 6.B y 7.B.3, sugiriendo que posiblemente fue emplazado de manera posterior al miembro 6.B (Peña-Rodríguez, 2021).

3.2.3 Vulcanismo Caldérico

Este vulcanismo fue dividido en tres unidades, de acuerdo con Ferriz y Mahood (1984), que representan una secuencia de eventos explosivos principales que dieron origen a la morfología asimétrica de la caldera, que son:

Ignimbrita Xáltipan (unidad 5)

Es una de las unidades principales del CVLH, resultado de la erupción más grande del complejo volcánico de Los Humeros y de todo el Cinturón Volcánico Transmexicano, con un volumen expulsado de 290 km^3 de material y cubriendo un área de $4,600 \text{ km}^2$ (Cavazos-Álvarez et al., 2020). La erupción que generó el emplazamiento de la Ignimbrita Xáltipan es responsable del colapso de la Caldera de Los Humeros (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011). Esta erupción fue recientemente fechada en 164 Ka y marca también el inicio de dos grandes erupciones explosivas posteriores (Carrasco-Núñez et al., 2018). La Ignimbrita Xáltipan se extiende en el subsuelo de la caldera, directamente sobre la gruesa sucesión andesítica pre-caldera, altamente fracturada, y donde se encuentra la mayor parte del reservorio geotérmico (Cavazos-Álvarez y Carrasco-Núñez, 2019). Esta unidad se encuentra en 3 diferentes estados de consolidación o soldamiento: denso, mediano y sin soldar.

Toba Faby (unidad 4)

Se trata del segundo gran evento explosivo de la Caldera de los Humeros que data de hace $\sim 70 \text{ Ka}$ (Carrasco-Núñez et al., 2017b). Es una secuencia de depósitos de caída de composición dacítica y riodacítica que cubre de forma discordante a la ignimbrita Xáltipan. Según Ferriz y Mahood (1984), este depósito fue el producto de una sucesión de erupciones plinianas a partir de un conducto ubicado en la zona sureste dentro de la caldera, la cual provocó columnas eruptivas que se emplazaron posteriormente en un área aproximada de cerca de 1000 km^2 y con un volumen estimado de aproximadamente 10 km^3 . El espesor de la Toba Faby varía de entre 9 y 16 m a lo largo del eje este-sureste de la caldera, lo que implica una distribución preferencial hacia el sector oriental, debido a los vientos predominantes durante la fase eruptiva (Willcox, 2011).

Ignimbrita Zaragoza (unidad 3)

El tercer gran evento explosivo del CVLH dio como resultado la formación de la caldera de Los Potreros, asociada al emplazamiento de la Ignimbrita Zaragoza, comprende un volumen de aproximadamente 15 km^3 de material (Carrasco-Núñez y Branney, 2005). La ignimbrita Zaragoza se compone de una secuencia de depósitos piroclásticos de caída, tanto en su base como en la cima, que delimitan al flujo piroclástico principal; posee un espesor de hasta 20

m. Los materiales presentan un doble zoneamiento composicional que varía desde pómez riolacítica a escorias andesíticas, y finaliza con pomez riolacíticas hacia su cima, incluye fragmentos líticos de riolita, andesita, basaltos, calizas y clastos alterados (Carrasco-Núñez y Branney, 2005). Fechamientos recientes por el método Ar/Ar muestran edades de 69 ± 16 Ka (Carrasco-Núñez et al., 2018), en comparación con las edades reportadas anteriormente por Willcox (2011) de 140 Ka y por Ferriz y Mahood (1984) de 100 Ka.

3.2.4 Vulcanismo Post-Caldérico (unidades 1 y 2)

Esta etapa está conformada por la unidad 1 constituida por depósitos indiferenciados y paleosuelos, y por la unidad 2 que integra una diversidad de litologías. Se han identificado los siguientes miembros: andesitas basálticas de dos piroxenos y olivino (2.A), andesita porfídica de clinopiroxeno (2.B), traquiandesitas de clinopiroxeno (2.C), depósitos de pómez (2.D) y basaltos de dos piroxenos y olivino (2.E) (Peña-Rodríguez, 2021).

Esta fase eruptiva presenta una alternancia de erupciones efusivas y explosivas que dio origen a una serie de lavas y depósitos piroclásticos de composiciones variadas que van desde basaltos y andesitas, hasta traquiandesitas y traquitas. La distribución de estos flujos y depósitos muestran ser un tanto irregular, con evidencia de variaciones en el estilo eruptivo, lo que indicaría un origen en fuentes distintas (Carrasco-Núñez et al., 2017a).

Distintos eventos explosivos dieron lugar a el emplazamiento de varios depósitos conocidos como la Toba Xoxoctic (Ferriz 1985; Carrasco-Núñez et al., 2017a), así como algunos depósitos de brecha agrupados como la Toba Llano (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011), con edad mínima de 28.27 ± 0.11 Ka (Rojas-Ortega, 2016).

Las etapas de vulcanismo reciente incluyen las lavas intracaldera de San Antonio-Las Chapas datadas por carbono 14 en $8,910 \pm 30$ años (Carrasco-Núñez et al., 2017b) y flujos de composición basáltico-andesítico Orilla del Monte, los cuales se encuentran cubiertos por una secuencia de depósitos de caída de lapilli denominados Toba Cuicuiltic, la cual está fechada con una edad menor a los 7.3 Ka (Dávila y Carrasco-Núñez, 2014). Los eventos más recientes comprenden una serie de flujos de lavas de composiciones traquiandesíticas y basálticas emitidos hace 3900 años (Carrasco-Núñez et al., 2017a), así como los flujos de

lava traquíticos denominados como El Pájaro, fechados en 2.8 Ka (Carrasco-Núñez et al., 2017a) (Figura 7).

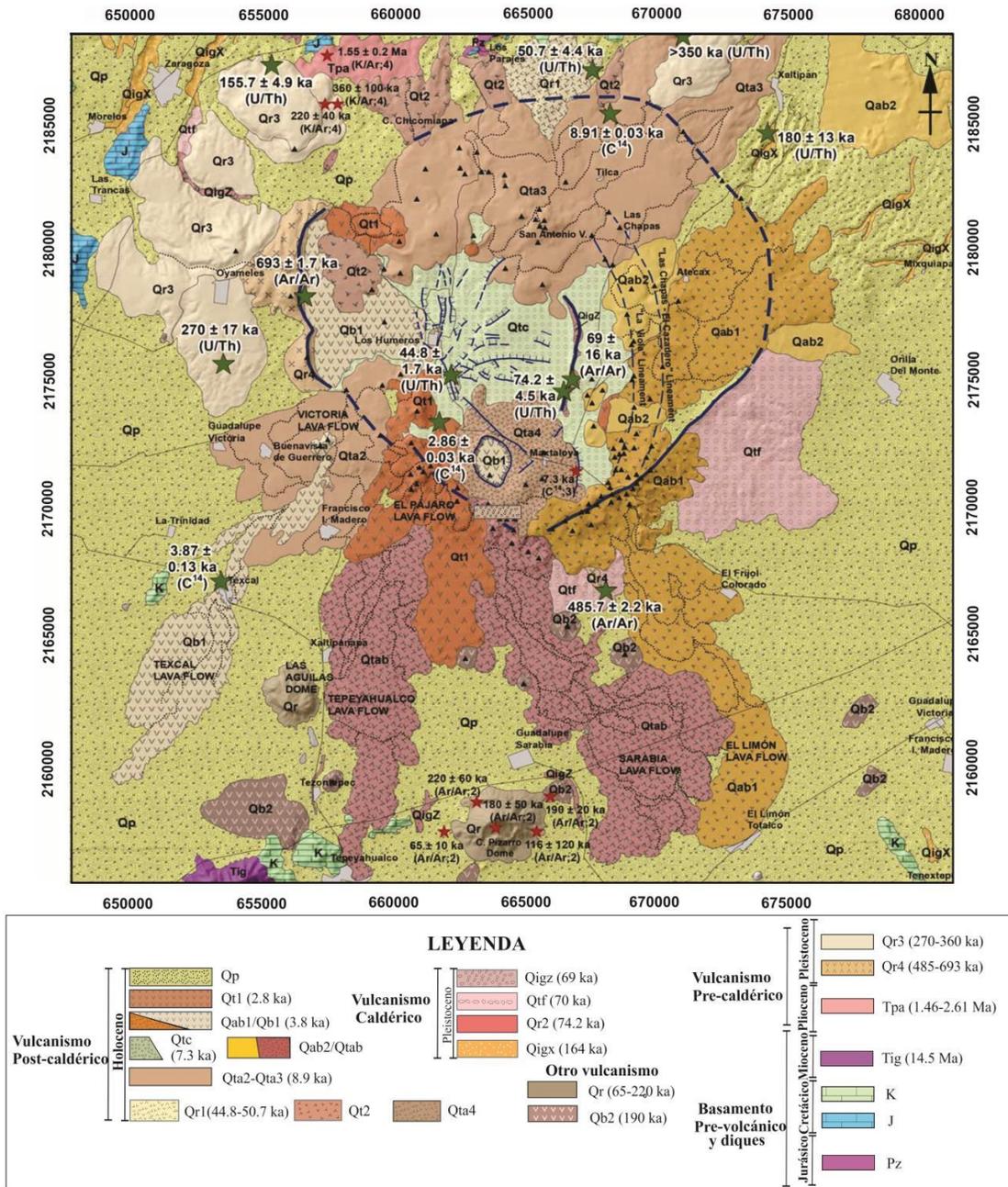


Figura 7 Mapa geológico simplificado de la caldera de Los Hornos. (Tomado de Peña-Rodríguez, 2021). Basamento Pre-volcánico- Pz/K: granodioritas y esquistos; J: calizas y lutitas; Tig: granito; Vulcanismo Pre-caldérico—Tpa: Lavas Teziutlán; Qr4-Qr3: domos riolíticos; Qb2, basaltos y andesitas basálticas; Qr: Domo riolítico C. Pizarro- Las Águilas; — Vulcanismo caldérico; QigX: Ignimbrita Xáltipan; Qr2: Diques riolíticos Los Potreros; Qtf: Toba Faby; QigZ: Ignimbrita Zaragoza — Vulcanismo Post-caldérico —Qt2: Traquiandesitas Chicomiapa-Los Parajes; Qr1: domos riolíticos; Qta4: Traquiandesitas Maxtaloya; Qta2: Traquiandesitas Victoria; Qtab: Traquiandesitas basálticas Tepeyahualco; Qab1: Andesitas basálticas Atecac; Qab2: andesitas basálticas; Qta3: Traquiandesitas San Antonio-Las Chapas; Qtc: Miembro Cuicuiltic; Qb1: Lavas basálticas de olivino; Qt1: Traquitas El Pájaro; Qp: depósitos piroclásticos indiferenciados. (Modificado de Carrasco-Núñez et al., 2018).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo incluye la recopilación y el análisis de la información relacionada a la zona de estudio y en torno al tema geotérmico, la generación de datos en laboratorio y, la interpretación y visualización de estos para realizar el análisis del fracturamiento en el CGLH, propósito principal de esta tesis.

En este capítulo se describen los métodos empleados para la obtención de información, su análisis y la creación de la base de datos necesaria para la elaboración del modelo 3D.

Con el propósito de cumplir con los objetivos de este proyecto, se propuso un plan metodológico el cual consiste en 3 etapas generales: **1. Generación de la información, 2. Procesamiento de los datos y 3. Construcción del modelo 3D**, las cuales se describen a continuación:

4.1. Generación de la información

4.1.1. Recopilación de información y selección de muestras

Se generó una base de datos integral a partir de la compilación de información procedente de artículos, tesis de licenciatura y reportes técnicos existentes. Mucha de la información está basada en la estratigrafía propuesta por Carrasco-Núñez et al. (2008, 2017b) y Peña-Rodríguez (2021), y en los estudios de carácter estructural de Norini et al. (2015, 2019). La recopilación bibliográfica comprende también estudios regionales de geofísica y más directamente trabajos de investigación de pozos individuales. De forma adicional, se ha recolectado información relacionada con los modelos conceptuales propuestos sobre el sistema geotérmico.

Como parte del análisis preliminar, se inventariaron y recolectaron las muestras de roca disponibles en el Centro de Geociencias de la UNAM. Estas muestras fueron extraídas de pozos perforados en el Campo Geotérmico de Los Humeros, proporcionadas por CFE y las láminas delgadas fueron elaboradas durante el desarrollo de los proyectos P05 de CeMIEGeo y del consorcio GEMEX, donde fueron utilizadas en trabajos previos para la caracterización petrográfica y geoquímica del campo.

Se utilizaron 485 muestras de esquirla en lámina delgada y 17 de muestras de núcleo, sumando un total de 502 muestras.

4.1.2. Análisis del fracturamiento en muestras de lámina delgada

La caracterización del fracturamiento se llevó a cabo mediante el empleo de un microscopio binocular de la marca Nikon modelo SMZ-2T, en el Laboratorio de Vulcanología del Centro de Geociencias de la UNAM, Campus Juriquilla. Se desarrolló una escala para el análisis cualitativo de fracturamiento que considera dos parámetros en las muestras de roca, una valoración del grado de fracturamiento en porcentaje, al que denominamos intensidad y la cantidad de fracturas detectadas por muestra, al que denominamos frecuencia, con el objetivo de normalizar el grado de fracturamiento total.

El análisis cualitativo está basado en la extrapolación del análisis visual de porcentajes, comúnmente utilizado para estimar el porcentaje de una composición mineral en muestras de roca (propuesto por De Baccelle y L. Bosollini, 1965), sólo que ahora aplicado para fracturas, como se muestra en la Figura 8. Este análisis visual se llevó a cabo en las 485 muestras de lámina delgada, asignando un valor de acuerdo con el grado de fracturamiento observado en cada lámina (Ver Anexo I). Cabe mencionar que, en algunos casos, las muestras no reunieron el tamaño mínimo para ser analizadas, por lo que el número de muestras fue limitado y no cubrió a todas las unidades y miembros de los diferentes grupos estratigráficos, siendo esto una limitación para obtener una caracterización sistemática de todo el campo.

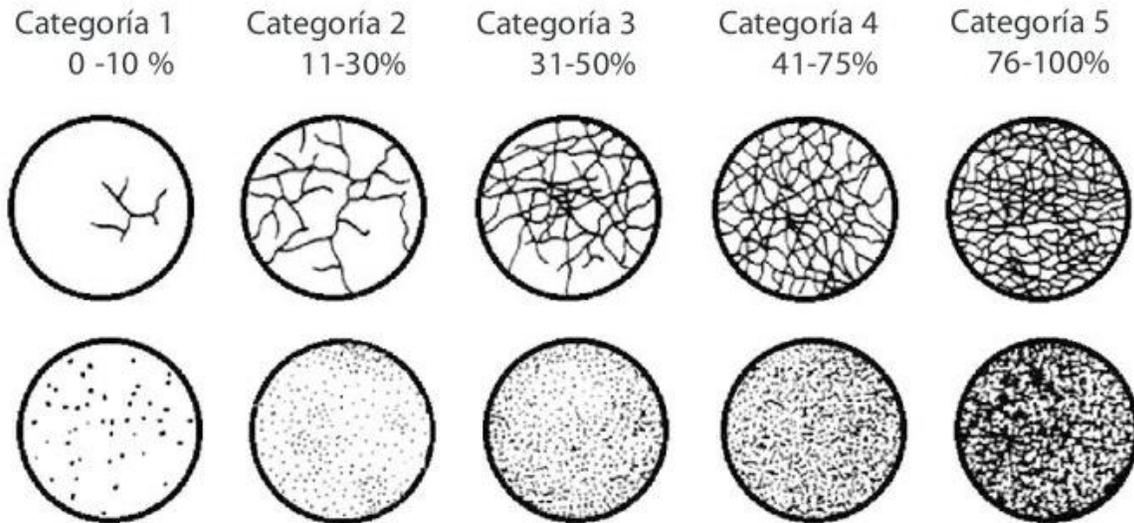


Figura 8. Ejemplo de una estimación visual de porcentajes para fracturas extrapolando los porcentajes de contenidos minerales. (Modificado de Arellano-Méndez et al., 2016).

Se realizaron estimaciones preliminares de fracturamiento para establecer el concepto de “densidad de fracturamiento” como el número de discontinuidades por área de visualización, considerando una propuesta empírica de escala de fracturamiento en la que se definen diferentes categorías (Figura 9), de acuerdo a los niveles identificados en las muestras analizadas.

4.1.3. Digitalización de muestras

Con el objetivo de obtener valores cuantitativos con los cuales comparar el análisis visual y normalizar el grado de fracturamiento, se realizaron escaneos digitales de todas las muestras de lámina delgada de núcleo y se seleccionaron las muestras de lámina delgada de esquirlas de acuerdo con el tamaño de los fragmentos de roca presentes. En este apartado, se describe el proceso de digitalización de las muestras.

Las láminas fueron digitalizadas en un escáner EPSON Perfection V850 a una resolución de 6400 DPI. Posteriormente, se seleccionaron las láminas con la mejor calidad, basándose en el brillo, la nitidez y el contraste que permitieran su correcto análisis durante la fase de procesamiento digital.

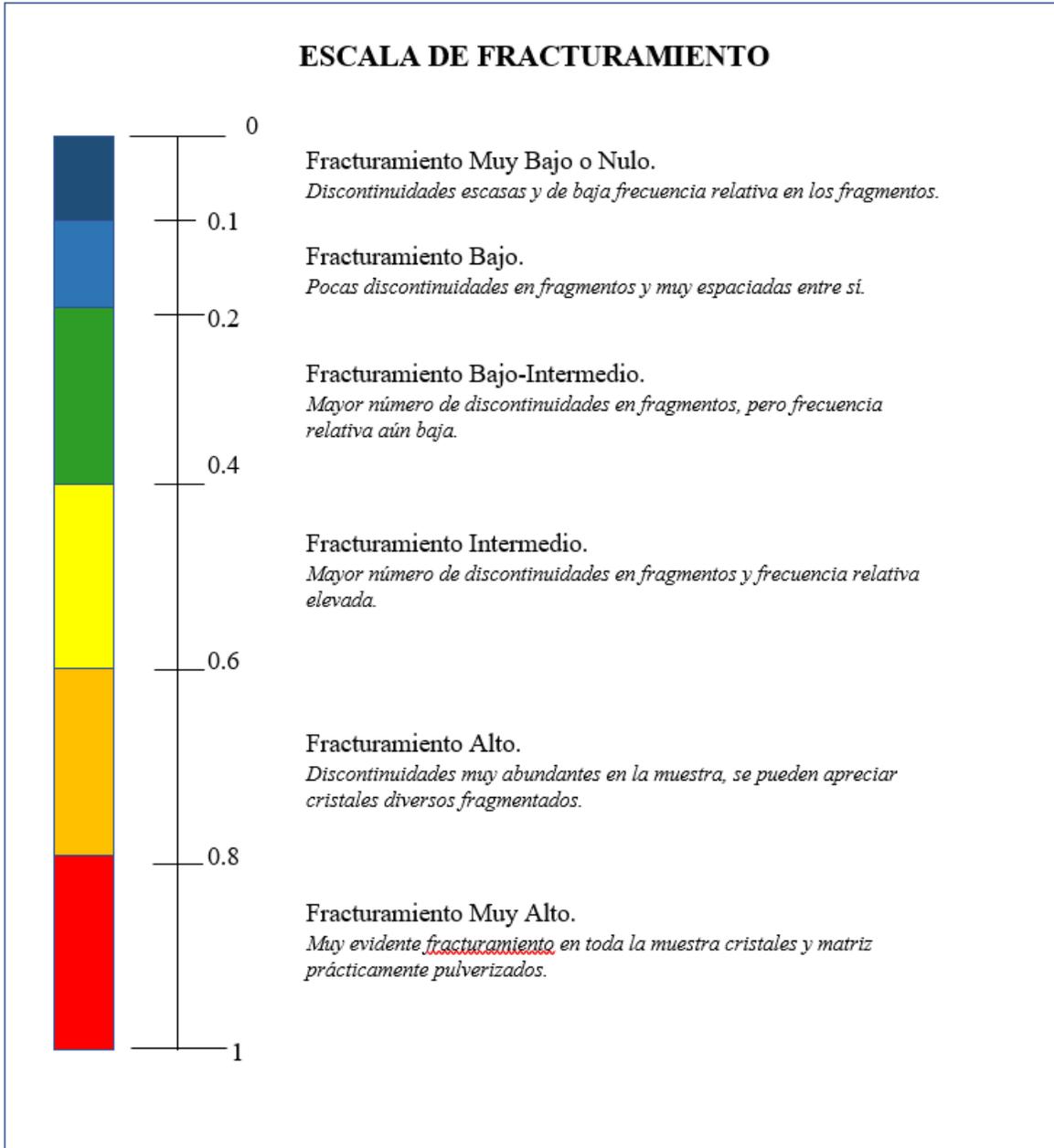


Figura 9. Escala propuesta para la densidad de fracturamiento que considera el grado de fracturamiento (Intensidad) y la cantidad de fracturas en la muestra (frecuencia).

4.2. Procesamiento de la información

4.2.1. Medición de fracturas y cálculo de densidades de fracturamiento

Después de completar el inventario digital de las muestras de los pozos objeto de estudio, se procedió a obtener los valores cuantitativos de fracturamiento, mediante el procesamiento de las imágenes resultado del escaneo.

El procedimiento utilizado para la medición de fracturas se desarrolló con base en la metodología propuesta por Nieto-Samaniego et al., (2003). El grado de fracturamiento de las muestras fue cuantificado utilizando la densidad de fracturamiento, definida como la longitud de trazas de fractura medidas (L), dividida entre el área en donde fueron medidas (A). (Ecuación 1).

Ecuación 1.

$$D = \left(\frac{1}{A}\right) \sum \left(\frac{L_i}{2}\right)^2$$

Donde *A* es el área en la que se observan las fracturas y *Li* la longitud de cada fractura.

De acuerdo con Rueda et al. (2010), una de las limitantes de la metodología convencional utilizada para obtener la densidad de fracturamiento en muestras de roca, es que, al elaborar las secciones delgadas se deben realizar tres cortes perpendiculares, uno para cada plano, con la finalidad de tener un control tridimensional durante el análisis, ya que si solo se realiza un corte este dato podría ser insuficiente o engañoso debido a que no poseerían información espacial más allá de la ubicación de la muestra. Sin embargo, las muestras disponibles en este estudio eran muy limitadas y el tamaño no permitió el corte en los tres planos, salvo por un número reducido de muestras de núcleo. Se decidió no hacer cortes en tres direcciones debido a que esto habría limitado la generalización de los datos y limitaría el área de estudio. Teniendo en cuenta esto, el cálculo de la densidad de fracturamiento se hizo a partir de la metodología convencional, considerando un parámetro unidimensional en los cortes de láminas delgadas preexistentes (usadas en estudios previos con otros fines) con el propósito de aplicar una metodología de manera homogénea para todas las muestras, a fin de identificar patrones que indiquen una correlación entre el grado de fracturamiento y la estratigrafía del reservorio. Con las medidas reservadas, estos parámetros unidimensionales se interpolaron para integrar un modelo tridimensional esquemático del reservorio.

Para el procesamiento de las imágenes y el cálculo de la densidad de fracturamiento se utilizó el software *Inkscape* el cual es un editor profesional de vectores gráficos escalables libre y de código abierto.

El software de edición permite ajustar la escala de las imágenes a trabajar, por lo que la única entrada que toma en cuenta es la resolución a la cuál ha sido escaneada la imagen, en este

caso una resolución de 6400 DPI. Posteriormente, se ajusta la unidad de longitud a mostrar y la imagen obtenida fue escalada en una relación 1:1.

El proceso para la obtención de los parámetros necesarios fue el siguiente:

Cada imagen de lámina delgada escaneada fue cargada empleando el software antes mencionado y posteriormente se delimitaron las áreas de cada fragmento de esquirra o núcleo, y al final todos los valores de área fueron registrados. El siguiente paso fue identificar las fracturas de forma visual y trazarlas manualmente a partir de los datos escaneados como se muestra en las imágenes de la Figura 10. Posteriormente, se calculó la densidad de fracturamiento para cada muestra a partir de los parámetros antes descritos.



Figura 10. Ejemplos de imágenes digitales de láminas delgadas que muestran el proceso de identificación de fracturas en las muestras de esquirra para la obtención de la densidad de fracturamiento.

4.2.2. Base de datos de fracturamiento

En la base de datos, creada con el software Excel, se almacenaron los datos obtenidos durante el procesamiento de las imágenes: el área de los fragmentos de roca, las longitudes de las trazas de fractura y la densidad de fracturamiento para cada una de las muestras analizadas.

Posteriormente se realizó una depuración de datos, y se complementaron algunos valores faltantes debido posiblemente a errores en la carga de los datos. El siguiente paso fue organizar los datos en un documento con formato *CSV (Comma Separated Values)* requerido para su importación al software de modelado *Leapfrog Geo*.

4.3. Construcción del modelo 3D

4.3.1. Consideraciones del software *Leapfrog Geo*

Leapfrog Geo es un software de visualización y modelado de datos geológicos, desarrollado por la compañía ARANZ GEO (*Applied Research Associates New Zeland Ltd.*), desde el 2003, y conocida desde 2018 como *Seequent*. Este software constituye una herramienta de apoyo para asistir en la visualización de información y la toma de decisiones. El software de modelado tridimensional maneja distintos tipos de información geológica, desde mapas e imágenes, datos geoquímicos, geofísicos y de carácter estructural. Otra consideración es que *Leapfrog Geo* permite agregar o modificar los datos en tiempo real, de esta forma los modelos pueden ser contruidos de una manera flexible y eficaz.

4.3.2. Funciones de Base Radial (FBR)

La zona de fracturamiento propuesta en este trabajo fue modelada utilizando las Funciones de Bases Radiales (FBR). Las FBR son un método de interpolación usado por primera vez por Hardy (1971) para interpolar datos topográficos dispersos, pero también se extendió su uso a áreas como la hidrología, fotogrametría y geodesia (Wright, 2003). El método está diseñado para rellenar los espacios no conocidos entre un grupo de datos conocidos de manera que pueda justificarse matemática y geológicamente.

Las Funciones de Base Radial se definen como el conjunto de funciones ϕ que satisfacen la siguiente definición:

$$\Phi : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R} : x \rightarrow \phi(\|x\|)$$

Donde $x \in \mathbb{R}^n$ y $\|x\|$ es la norma (euclidiana) del espacio \mathbb{R}^n , es decir:

$$\|x\| = \sqrt{(x, x)} = \sqrt{\sum_{k=1}^n x_k^2}$$

Las aplicaciones más reconocidas de las FBR son como interpoladores de datos. Para esto se toma una función discreta dada $\{f_j\}_{j=1}^N \in \mathbb{R}$ generada por los vectores $\{x_j\}_{j=1}^N \in \mathbb{R}^n$ que proponen una función continua como combinación lineal de las FBR y que satisface las condiciones de interpolación, es decir:

$$s(x) = \sum_{k=1}^N \lambda_k \phi(\|x - x_k\|)$$

Donde los λ_k son constantes reales que satisfacen el sistema de ecuaciones lineales:

$$\begin{pmatrix} \varphi_{11} & \cdots & \varphi_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{N1} & \cdots & \varphi_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_N \end{pmatrix}$$

Esta ecuación se puede escribir como:

$$\varphi \lambda = f$$

A partir de la siguiente definición:

$$\varphi_{jk} = \phi(\|x_j - x_k\|)$$

Una interpretación geométrica del método nos muestra que cada punto se construye por funciones que dependen de la distancia que existe entre los puntos cercanos al punto a interpolar (Figura 11).

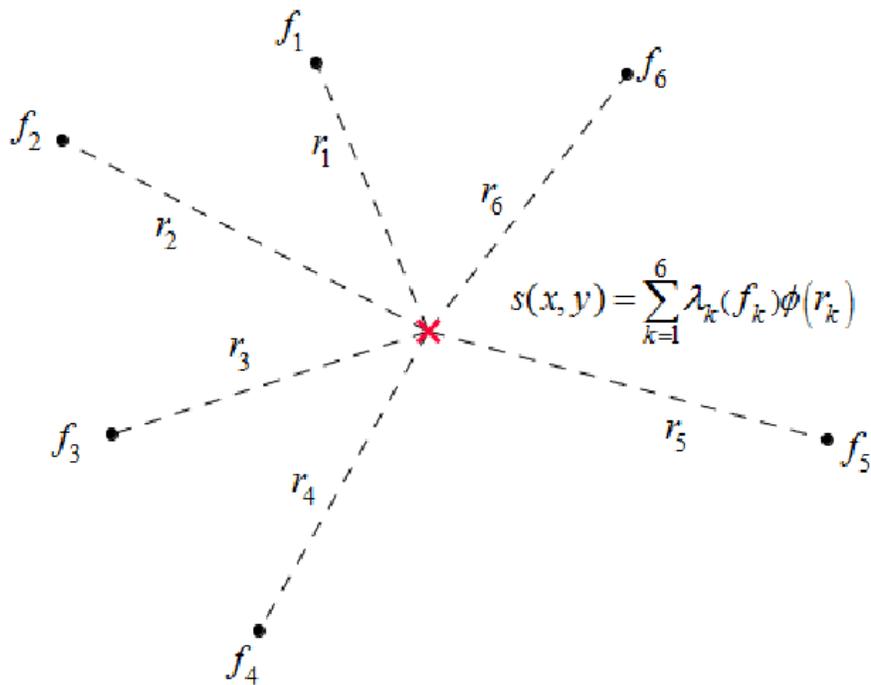


Figura 11. Representación esquemática de la interpolación por funciones de base radial (FBR). Tomada de Rojo-García (2013).

Las funciones de base radial (FBR) se consideran herramientas de aproximación que permiten asociar una función continua a un conjunto de datos discretos, en donde el argumento es la norma euclidiana tomada como la distancia entre el punto a evaluar y un punto denominado centro (Aguilar-López, 2009). El software *Leapfrog Geo* permite la implementación de las FBR como algoritmos de interpolación y extrapolación para datos continuos (numéricos) y categóricos (geológicos). Al igual que el método de Kriging (Oliver, 1990), la interpolación con FBR no utiliza un método demasiado simplificado para estimar puntos desconocidos, sino que produce una función que modela los datos conocidos y puede proporcionar una estimación para cualquier punto no conocido. Franke (1982) habla del método multicuadrático como el más preciso de los métodos por FBR. Aunque los diversos métodos de FBR han tenido buenos resultados sobre otros interpolantes, en la exploración geofísica (interpolación de mallas) su uso se ha extendido de manera más reciente, donde generalmente eran más usados los métodos de Kriging. Caruso (2009) mediante un estudio con datos geofísicos hecho con FBR menciona las ventajas que estos pueden tener en comparación con Kringing.

Seequent amplió la aplicación de las FBR en *Leapfrog* para la creación de superficies de contactos litológicos a partir de datos de pozos, complementándola con puntos de datos integrados desde la interpretación geológica. La anisotropía en las FBR es aplicada para hacer que las superficies sean geológicamente consistentes, mediante contactos utilizados para dividir el espacio y crear unidades geológicas tridimensionales (Alcaraz et al., 2011). En *Leapfrog Geo* los objetos tridimensionales se guardan como funciones continuas y se utilizan para generar superficies con resoluciones definidas, de esta forma el usuario puede modificar parámetros de alto nivel, como la anisotropía, para influir de manera directa en el modelado final.

4.3.2. Modelado de una sección geológica del subsuelo

En esta sección se describe la construcción del modelo 3D a partir de los datos recopilados y obtenidos durante el procesamiento de las imágenes digitales.

El modelado de las secciones litoestratigráficas del subsuelo se realizó a partir de la reevaluación de las unidades litológicas del campo realizado por Peña-Rodríguez, (2021). Para delimitar los pozos, de acuerdo con las nuevas unidades y miembros redefinidos, se debe crear un archivo en formato *CSV* que contenga los intervalos litológicos correctos, el cual fue nombrado como *Geology*.

Para la creación del modelo geológico en el software *Leapfrog Geo* se debe delimitar la zona del área de estudio, en este caso, a partir de un modelo de elevación digital (*DEM*, por sus siglas en inglés) el cual contiene las coordenadas geográficas adecuadas. Posteriormente se importan los archivos de carácter espacial y geológico en formato *CSV* denominados *Collar*, *Survey* y *Geology*. Estos archivos contienen datos equivalentes a la posición de los pozos, su inclinación y profundidad, junto con los intervalos correspondientes a las unidades geológicas del subsuelo. Una vez cargados los archivos *Collar*, *Survey* y *Geology* es posible visualizar los pozos y su posición respecto al *DEM* en un entorno tridimensional.

El siguiente paso es generar un nuevo modelo geológico, para lo cual se debe seleccionar la carpeta *Geological Models* en el árbol de proyecto, con ello se añade un nuevo modelo geológico en la escena y se selecciona la columna correspondiente a la litología y al área que se desea generar, en este caso, la superficie que comprende los pozos objeto de estudio.

Posteriormente, se generan las capas o superficies de contacto entre unidades para la posterior generación de los volúmenes pertenecientes a estos paquetes estratigráficos dentro del campo, para esto se añade una nueva capa con ayuda de la herramienta *Surface Chronology* (Figura 12), la cual se utiliza para la creación de todas las capas necesarias que comprenden la sección del subsuelo. Para la elaboración de las capas se comienza por las litologías superficiales, avanzando en orden cronológico y dejando para el final la generación de los intrusivos riolíticos de la unidad 6 y la zona de alteración, cuyo emplazamiento es posterior a los depósitos pertenecientes al grupo caldérico.

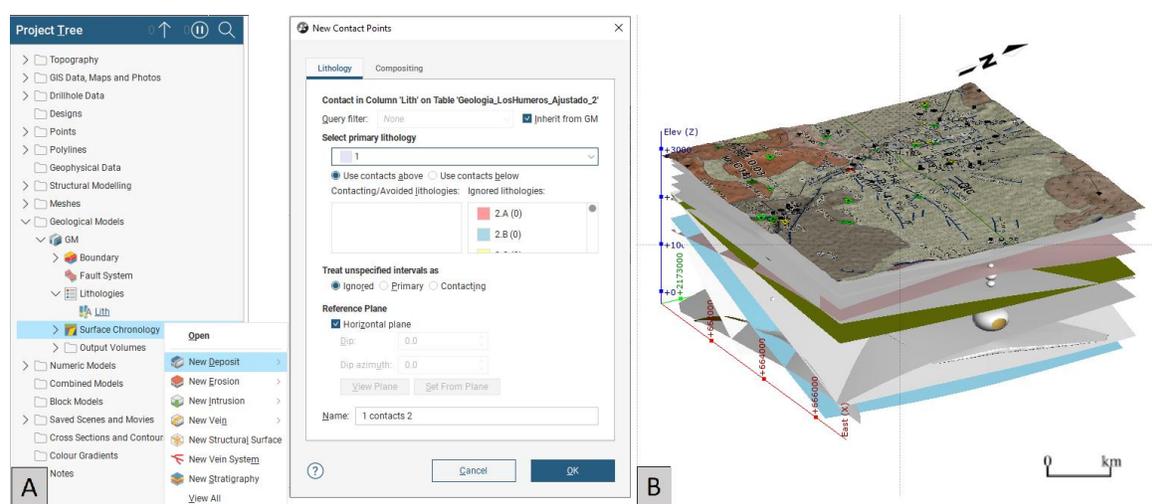


Figura 12. A) Captura de pantalla que muestra las diferentes capas que delimitan las unidades litológicas en el modelo estratigráfico para la zona de estudio. B) Corte de la sección del campo geotérmico donde se pueden visualizar las superficies de contacto entre litologías. Escala vertical x1.

Una vez que se han diseñado las superficies de contacto entre unidades, se procede a la creación de los volúmenes que rellenan estos espacios como se muestra en la Figura 13. Estos volúmenes actúan como las zonas tridimensionales, que comprenden la estratigrafía del subsuelo y que han sido interpoladas a partir de la presencia de estas unidades litológicas en los pozos geotérmicos del campo.

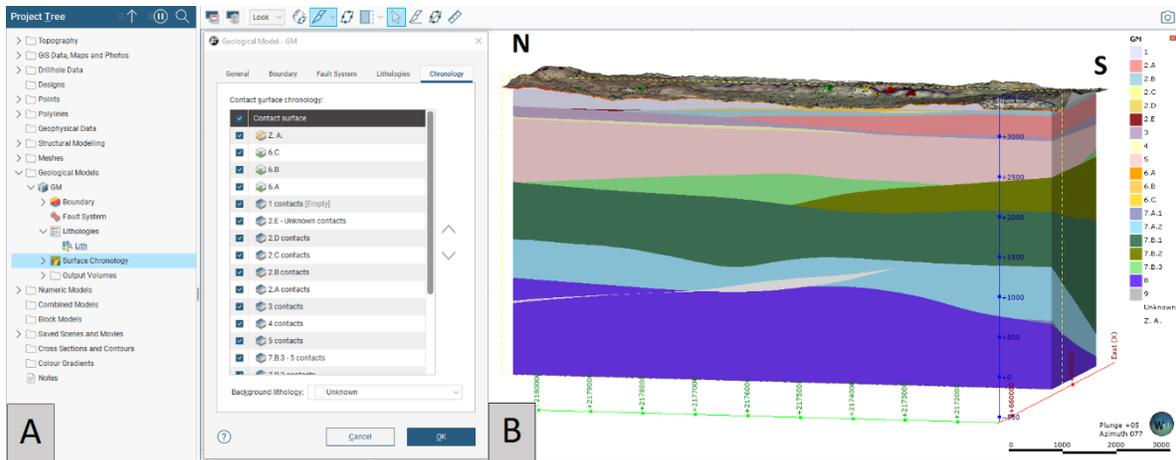


Figura 13. Generación del modelo geológico con el software Leapfrog Geo. A) Captura de pantalla que muestra los pasos para la creación de los volúmenes entre capas de contacto pertenecientes a las unidades litológicas. En el árbol de proyectos se selecciona la pestaña Cronología de superficies y posteriormente se acomodan las unidades en orden de emplazamiento. B) Sección estratigráfica Norte-Sur del área del campo geotérmico. Se observan los volúmenes litológicos..

4.3.3. Modelado del fracturamiento

Para el modelado del fracturamiento en el subsuelo se importaron en el software *Leapfrog Geo* los datos de las densidades de fracturamiento obtenidas a partir de las muestras de lámina delgada. Vale la pena recordar que los datos de densidad de fracturamiento funcionan como un indicador normalizado (unidimensional) para obtener una aproximación de las zonas de fracturamiento presentes en el subsuelo. Esta información cuantitativa es condensada en una base de datos en Excel, en donde debe ser organizada como se explica a continuación.

La Tabla 3 muestra la forma en que deben colocarse los datos de densidad de fracturamiento. Primero, se observa una columna con el identificador del pozo (*holeid*), después se crean tres columnas con las coordenadas *x*, *y*, y *z* respectivamente, para que los datos sean ubicados correctamente dentro del *DEM* y, finalmente, una columna que contiene los datos de densidad de fracturamiento, el archivo de Excel debe encontrarse en el formato *CSV* para su correcta importación en *Leapfrog Geo*.

Tabla 3. Ejemplo de los datos de densidad de fracturamiento preparados para su importación en Leapfrog Geo. Los datos ordenados en columnas contienen el identificador del pozo (*hole id*), las coordenadas espaciales X Y Z y finalmente el dato que indica la densidad de fracturamiento en la muestra.

holeid	X	Y	Z	DF
H-5	660540	2175950	2728.46	0.09
H-5	660540	2175950	2628.46	0.12
H-5	660540	2175950	2558.46	0.1
H-5	660540	2175950	2528.46	0.08
H-5	660540	2175950	2478.46	0.05
H-5	660540	2175950	2468.46	0.1
H-5	660540	2175950	2398.46	0.12
H-5	660540	2175950	2338.46	0.09
H-5	660540	2175950	2318.46	0.2
H-5	660540	2175950	2278.46	0.15
H-5	660540	2175950	2228.46	0.16
H-5	660540	2175950	2218.46	0.07
H-5	660540	2175950	2178.46	0.22
H-5	660540	2175950	2148.46	0.15
H-5	660540	2175950	2128.46	0.12
H-5	660540	2175950	2118.46	0.18
H-5	660540	2175950	2108.46	0.25
H-5	660540	2175950	2078.46	0.1
H-5	660540	2175950	2028.46	0.21

Una vez que han sido importados los datos, se procede a la etapa de interpolación de fracturamiento en el subsuelo, considerando la siguiente metodología: dentro del software Leapfrog Geo, en la barra lateral denominada *Project Tree*, se encuentra la pestaña *Numeric Models*, donde se procede a crear el modelo numérico que mostrará las interpolaciones de los datos de entrada. Al seleccionar la primera opción (*New RBF Interpolant*), se abre la ventana de configuración para el nuevo modelo numérico, en el cual se agregan los archivos numéricos previamente importados, así como el volumen y la resolución del modelo como se muestra en los diagramas de la Figura 14.

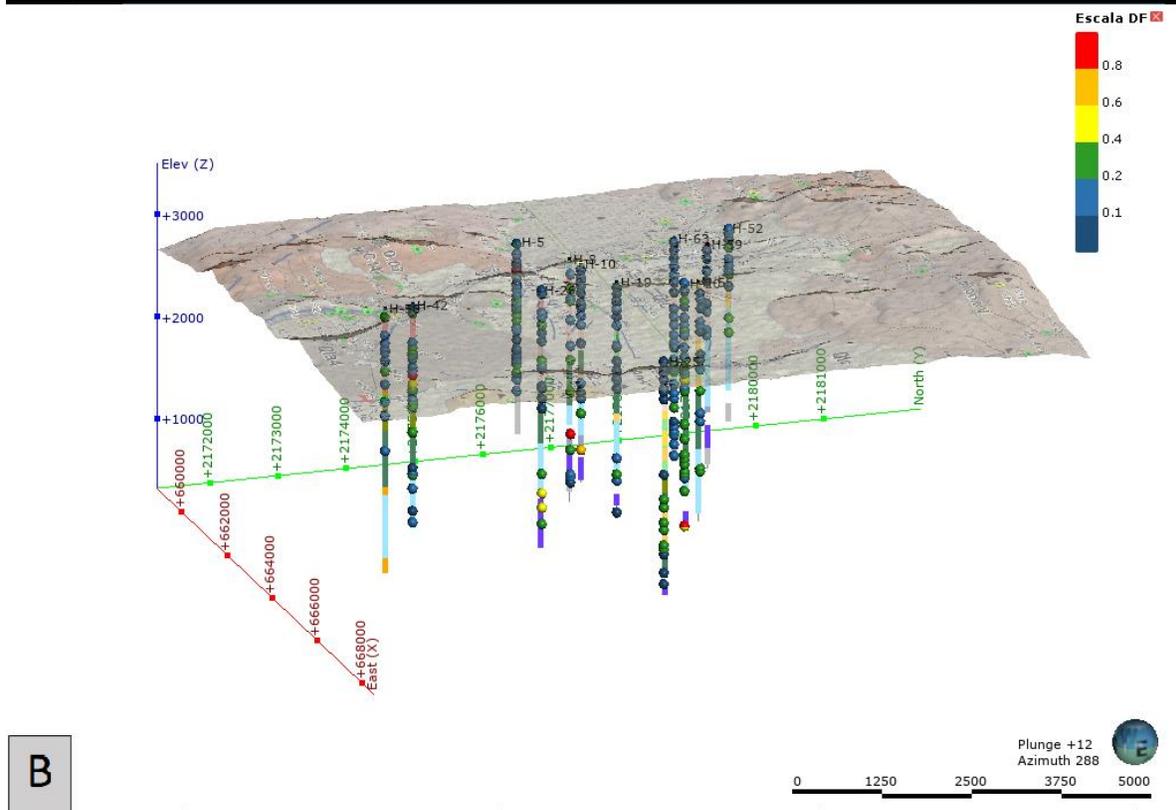
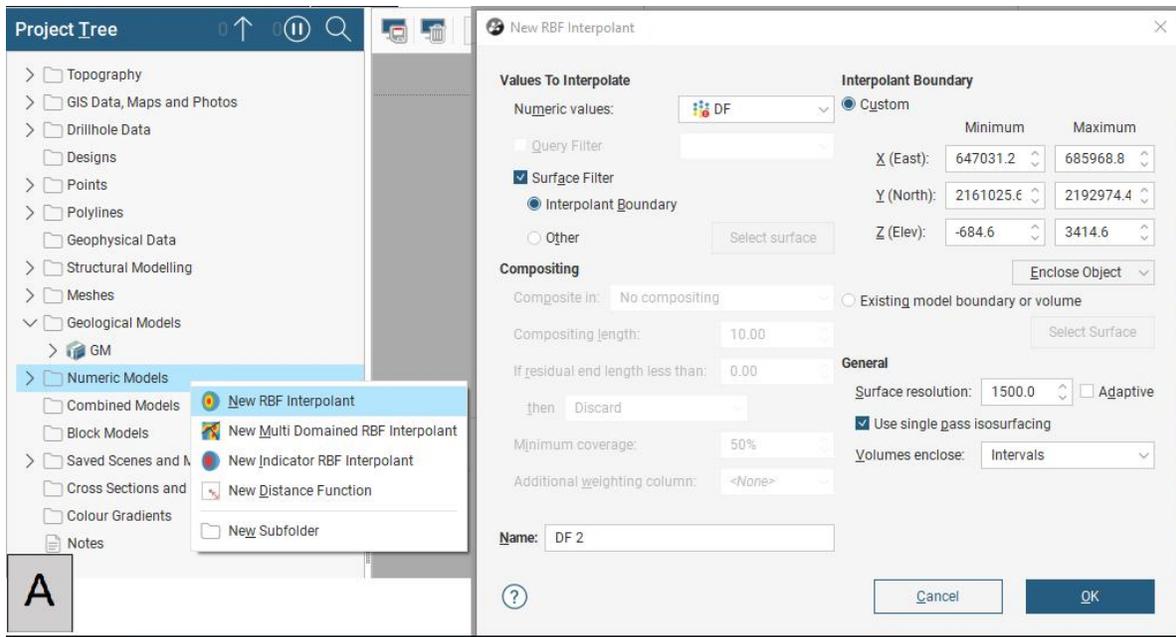


Figura 14. Procesamiento de los datos de densidad de fracturamiento. A) Pasos para la creación del modelo numérico en Leapfrog Geo. B) Vista tridimensional del mapa geológico de Los Humeros, mostrando la proyección de los pozos geotérmicos (líneas verticales) y los datos de fracturamiento (círculos de color), según la escala gráfica mostrada en la esquina superior derecha.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados del análisis, procesamiento y la interpretación de los datos generados.

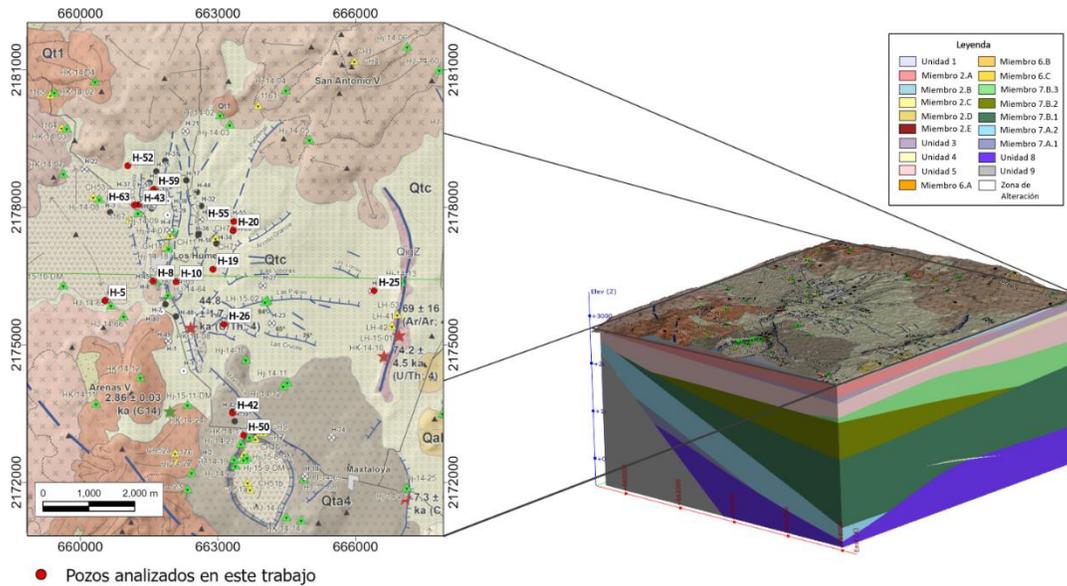


Figura 15. Ubicación de los pozos en la sección geológica del modelo tridimensional.

La caracterización del fracturamiento de los pozos H-5, H-8, H-10, H-19, H-20, H-25, H-26, H-42, H-43, H-50, H-52, H-55, H-59 y H-63 (Figura 15) del campo geotérmico de Los Humeros se realizó mediante el procesamiento de 233 imágenes, producto de la digitalización de 379 muestras de núcleo y esquirlas en lámina delgada correspondientes a muestras representativas de los 14 pozos con profundidades variables de entre 2 y 2.8 kilómetros de profundidad. Tomando como referencia las descripciones previas de los estudios de esos pozos, los datos del modelo tridimensional de la caldera (Fernández-Maya, 2021) y la reevaluación litoestratigráfica del subsuelo del campo (Peña-Rodríguez, 2021) se realizó el análisis del fracturamiento, como ya se explicó en el capítulo anterior obteniendo los resultados que aquí se presentan.

5.1. Variación estratigráfica de la densidad de fracturamiento

La normalización de la densidad de fracturamiento se realizó de acuerdo con los valores obtenidos, siendo estos de 0.043 el valor más bajo, y 0.91 el valor más alto, por esta razón se consideró una normalización adecuada del fracturamiento los valores de la escala entre 0 y 1.

Los datos obtenidos a partir del cálculo de densidad de fracturamiento para las muestras de lámina delgada muestran una buena correlación con datos de fracturas y de fallas inferidas reportados en los trabajos de petrografía previos.

Se consideró un umbral indicado como fracturamiento bajo-intermedio en los datos mayores o iguales a 0.2 en densidad de fractura, como valores que pueden representar horizontes o zonas permeables de interés. Las columnas de fracturamiento se correlacionaron con datos de pérdida de circulación para comprobar las zonas que CFE indica como permeables dentro del reservorio.

Tabla 4. Resultados de las densidades de fracturamiento calculadas (DF) para muestras de los pozos H5, H8, H10, H19, H20, H25 y H26, se resaltan en color beige las muestras provenientes de núcleo y se indican con una "x" las zonas de fracturamiento inferido (FI). También se señala la unidad-miembro (U-M) a la que pertenece cada muestra en la estratigrafía mostrados en la tabla 2.

H-5				H-8				H-10				H-19				H-20				H-25				H-26			
Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M
30	-	0.09	2.C	160	-	0.14	2.A	60	-	0.043	2.C	70	-	0.05	2.B	20	-	0.12	2.D	10	-	0.1	2.C	10	-	0.07	2.C
130	-	0.12	2.B	300	-	0.15	2.A	130	-	0.045	2.B	130	-	0.03	2.A	100	-	0.09	2.D	90	-	0.05	2.D	40	-	-	2.C
200	-	0.1	2.B	400	-	0.17	5	170	-	0.128	2.D	190	-	0.1	5	200	-	0.21	3	130	-	0.02	2.D	50	-	0.04	2.B
230	-	0.08	2.B	420	-	0.15	5	220	-	0.062	2.A	220	-	0.08	5	250	-	0.1	5	190	-	0.04	3	130	-	-	2.A
280	-	0.05	2.A	480	-	0.1	5	290	-	0.041	5	270	-	0.12	5	360	-	0.14	5	220	-	-	3	230	-	0.13	3
290	-	0.1	2.A	610	-	0.13	5	390	-	0.076	5	290	-	0.1	5	430	-	0.19	6.B	280	-	0.04	5	280	-	0.11	4
360	-	0.12	2.A	700	-	-	5	430	-	0.062	5	350	-	0.04	5	480	-	0.22	5	310	-	0.066	5	350	-	0.33	5
420	-	0.09	5	860	-	0.11	5	470	-	-	5	440	-	0.12	5	490	-	0.2	5	380	-	0.086	5	410	-	-	5
440	-	0.2	5	1000	-	0.19	7.B.1	510	-	0.12	5	480	-	-	5	530	-	0.16	6.B	410	-	-	5	430	-	0.05	5
480	-	0.15	5	1310	-	0.24	7.B.1	600	-	0.107	5	520	-	-	7.B.3	650	-	0.16	6.B	510	-	-	6.C	460	-	-	5
530	-	0.16	7.B.1	1500	-	0.2	7.A.2	620	-	-	5	640	-	0.14	7.B.3	750	-	0.2	6.B	610	-	-	7.B.3	510	-	0.06	5
540	-	0.07	7.B.1	1724	-	0.91	7.A.1	710	-	-	5	650	-	0.1	7.B.3	850	-	0.23	6.C	740	-	-	6.C	540	-	-	5
580	-	0.22	7.B.1	1850	-	-	7.A.1	750	-	-	5	790	-	0.1	7.B.3	900	-	0.19	7.B.3	850	-	-	7.B.3	560	-	-	5
610	X	0.15	7.B.1	1880	-	0.23	8	780	-	0.09	5	880	-	0.045	7.B.3	920	-	0.21	7.B.3	970	-	-	6.B	610	-	-	5
630	-	0.12	7.B.1	1950	-	-	8	870	-	-	5	960	-	0.07	6.B	968	-	0.48	7.B.3	1050	-	-	7.B.3	670	-	-	5
640	-	0.18	7.B.1	2120	-	0.2	9	940	-	-	7.B.1	970	-	0.14	6.B	1050	-	0.15	7.B.1	1080	-	-	7.B.3	700	-	0.24	5
650	-	0.25	7.B.1	2150	-	0.21	9	1060	-	-	7.A.1	1060	-	0.05	7.B.1	1070	-	0.22	7.B.1	1120	-	0.07	7.B.2	750	-	0.15	5
680	-	0.1	7.B.1	2200	-	0.18	9	1140	-	-	6.A	1210	-	-	7.B.1	1080	-	0.26	7.B.1	1210	-	-	7.B.2	770	-	0.12	5
730	X	0.21	7.B.1					1170	X	0.158	6.A	1310	-	-	6.B	1400	-	0.38	7.B.1	1290	-	-	7.B.2	780	-	0.05	5
740	-	-	7.B.1					1270	-	0.081	7.A.2	1390	-	-	7.A.2	1410	-	0.3	7.B.1	1360	-	0.23	7.B.1	800	-	-	5
780	-	0.3	7.B.1					1320	-	0.12	7.A.2	1530	-	-	7.A.2	1550	-	0.28	7.B.1	1440	X	0.3	7.B.1	850	-	-	5
850	-	0.18	Z.A.					1450	-	-	6.A	1670	-	-	7.A.2	1700	-	0.31	7.B.1	1470	-	-	7.B.1	920	-	-	5
880	-	0.15	7.A.2					1467	X	0.26	6.A	1740	-	0.12	7.A.2	1710	X	0.36	7.B.1	1490	-	-	7.B.1	950	-	0.04	5
970	-	0.09	Z.A.					1580	-	-	7.A.2	1820	-	-	7.A.2	1750	-	0.28	7.B.1	1590	-	0.28	6.B	970	-	0.02	6.B
1060	X	0.16	Z.A.					1710	-	-	7.A.1	1870	-	-	7.A.2	1800	-	0.23	7.B.1	1660	-	0.24	6.B	1010	-	-	6.B
1080	-	0.05	7.A.2					1740	-	-	7.A.1	1900	-	0.4	Z.A.	1870	X	0.25	7.A.2	1810	-	0.35	6.B	1070	-	0.08	7.B.2
1120	X	0.15	7.A.2					1825	-	0.67	Z.A.	1960	-	0.14	Z.A.	1900	-	0.21	7.A.2	1850	X	0.22	6.B	1120	-	-	6.B
1150	X	0.2	Z.A.					1900	-	-	7.A.1	2020	-	-	Z.A.	1930	-	0.18	7.A.2	1900	-	0.1	7.B.1	1170	-	0.09	7.B.2
1180	-	0.16	Z.A.					1930	-	-	7.A.1	2130	-	-	8	2059	-	0.34	7.A.2	1970	-	-	7.B.1	1310	X	-	7.B.1
1210	-	0.25	7.A.1					2050	-	-	8	2200	-	-	8	2400	X	0.88	8	2080	-	0.1	7.B.1	1420	-	-	7.B.1
1290	-	0.23	7.A.1									2270	-	0.1	8	2402	-	0.55	8	2150	-	-	Z.A.	1520	X	-	7.B.1
1310	-	0.19	7.A.1																	2190	-	0.06	Z.A.	1610	-	-	7.A.2
1360	-	0.2	7.A.1																	2210	-	-	Z.A.	1640	X	-	6.B
1470	-	0.18	9																	2260	-	-	8	1670	X	-	7.A.2
																								1810	X	0.24	7.A.2
																								1910	-	-	7.A.2
																								2000	-	0.52	7.A.2
																								2050	-	-	Z.A.
																								2100	X	-	8
																								2140	-	0.45	8
																								2260	-	-	8
																								2300	-	0.29	8
																								2380	X	-	8
																								2400	-	-	8
																								2500	-	-	8
																								2540	X	-	8

Leyenda

- Unidad 1
- Miembro 2.A
- Miembro 2.B
- Miembro 2.C
- Miembro 2.D
- Miembro 2.E
- Unidad 3
- Unidad 4
- Unidad 5
- Miembro 6.A
- Miembro 6.B
- Miembro 6.C
- Miembro 7.A.1
- Miembro 7.A.2
- Miembro 7.B.1
- Miembro 7.B.2
- Miembro 7.B.3
- Unidad 8
- Unidad 9
- Zona de Alteración

Tabla 5. Resultados de las densidades de fracturamiento calculadas (DF) para muestras de los pozos H42, H43, H50, H52, H55, H59 y H63, se resaltan en color beige las muestras provenientes de núcleo y se indican con una "x" las zonas de fracturamiento inferido (FI). También se señala la unidad-miembro (U-M) a la que pertenece cada muestra en la estratigrafía mostrados en la tabla 2.

H-42				H-43				H-50				H-52				H-55				H-59				H-63			
Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M	Prof.	FI	DF	U-M												
30	-	-	2.C	210	-	0.3	5	90	-	0.21	2.A	30	-	0.11	2.E	140	-	0.063	3	60	-	0.1	2.E	60	-	0.05	2.E
50	-	0.1	2.C	290	-	0.15	5	270	-	0.12	2.A	60	-	0.09	2.E	200	-	0.11	3	140	-	0.08	5	140	-	0.05	5
90	-	0.25	2.C	320	-	0.09	5	350	-	0.16	3	70	-	0.15	2.E	290	-	0.07	5	260	-	0.12	5	220	-	0.04	5
240	-	-	2.A	370	-	0.13	5	410	-	0.18	3	130	-	0.1	5	390	-	-	5	360	-	0.09	5	300	X	0.11	5
350	-	-	2.A	400	-	0.22	5	440	-	0.16	5	210	-	0.24	5	420	-	-	5	490	-	-	5	380	X	0.13	5
370	-	-	2.A	440	-	0.2	5	520	-	0.2	5	240	-	-	5	420	-	0.19	5	580	X	0.1	5	450	-	0.13	5
380	-	0.2	3	505	-	0.12	5	620	-	0.22	5	320	-	0.13	5	460	-	0.18	5	660	X	0.12	5	550	-	0.07	5
410	-	-	5	856	-	-	7.A.2	750	-	0.15	5	390	-	0.15	5	460	-	0.16	5	840	X	0.15	5	710	-	0.12	5
430	-	0.21	5	885	-	0.09	7.A.2	920	-	0.11	6.A	440	-	0.2	5	520	-	0.09	5	890	X	0.2	7.A.2	790	X	0.19	7.A.2
480	-	0.21	5	925	-	0.08	7.A.2	1020	-	-	7.B.2	470	-	0.23	5	600	-	-	6.B	1150	-	-	7.A.2	870	-	0.15	7.A.2
500	-	0.15	5	975	-	0.24	7.A.2	1060	-	0.12	7.B.2	540	-	-	5	740	-	0.04	6.B	1160	X	-	7.A.2	970	-	0.15	7.A.2
520	-	0.21	5	1005	-	-	7.A.2	1250	-	-	7.B.1	590	-	0.15	6.B	800	-	0.05	6.C	1170	-	-	7.A.2	1040	X	0.17	7.A.2
540	-	0.19	5	1105	-	-	7.A.2	1400	X	0.16	7.B.1	700	-	-	6.B	890	-	0.15	7.B.3	1210	X	-	7.A.2	1090	X	0.145	7.A.2
560	-	-	5	1205	-	0.09	7.A.2	1450	-	-	7.B.1	820	-	-	7.A.2	1010	-	-	6.B	1230	X	-	7.A.2	1140	X	-	7.A.2
600	-	-	5	1215	-	-	7.A.2	1500	X	-	7.B.1	900	-	0.25	7.A.2	1100	X	0.22	7.B.1	1320	-	-	7.A.2	1190	-	-	7.A.2
620	-	0.11	5	1485	-	-	7.A.2	1550	-	-	7.B.1	990	-	-	7.A.2	1270	-	-	7.B.1	1360	X	-	7.A.2	1210	X	0.12	7.A.2
660	-	0.18	5	1635	-	0.07	7.A.2	1590	X	-	7.B.1	1040	-	0.21	7.A.2	1320	X	0.2	7.B.1	1400	X	-	7.A.2	1250	X	0.25	7.A.2
700	X	0.82	5	1635	-	-	7.A.2	1610	X	-	7.B.1	1100	-	-	7.A.2	1400	-	0.11	7.B.1	1440	X	-	7.A.2	1300	X	0.18	7.A.2
770	-	-	5	1645	-	-	Z.A.	1670	-	-	7.B.1	1170	-	-	7.A.2	1510	-	-	7.B.1	1490	X	-	7.A.2	1330	X	0.26	7.A.2
790	X	0.41	5					1720	-	-	7.B.1	1220	-	-	7.A.2	1560	-	-	7.B.1	1530	X	-	7.A.2	1420	X	-	7.A.2
840	-	0.22	7.B.3					1770	X	-	6.A	1280	-	-	7.A.2	1620	-	-	7.B.1	1560	-	-	7.A.2	1450	X	0.2	7.A.2
860	-	0.25	6.B					1830	X	-	6.A	1320	-	-	7.A.2	1640	-	-	7.A.2	1570	-	-	7.A.2	1540	X	0.18	7.A.1
920	-	-	7.B.3					1880	X	-	7.A.2	1380	-	-	7.A.2	1690	-	-	7.A.2	1610	X	-	7.A.1	1590	X	0.14	7.A.1
930	-	-	6.A					1940	X	-	7.A.2	1430	-	-	7.A.2	1760	-	-	7.A.2	1700	-	-	Z.A.	1680	-	0.21	Z.A.
940	X	0.16	6.A					1960	X	-	7.A.2	1460	-	-	7.A.2	1800	-	-	7.A.2	1740	-	-	Z.A.	1720	-	-	Z.A.
950	-	-	6.A					2010	X	-	7.A.2	1510	-	-	7.A.2	1840	-	-	7.A.2	1750	-	-	Z.A.	1780	-	-	Z.A.
960	-	0.28	6.A					2050	-	-	7.A.2	1540	-	-	7.A.2	1860	-	0.25	7.A.2	1830	-	-	8	1820	-	0.1	9
970	-	0.22	7.B.2					2060	-	-	7.A.2	1570	-	-	7.A.2	1890	-	0.275	7.A.2	1930	-	-	8	1850	-	-	9
1000	-	0.26	7.B.2					2100	X	-	7.A.2	1600	-	-	Z.A.	1890	-	-	7.A.2	1980	X	-	8	1870	-	0.22	9
1020	-	0.33	7.B.2					2140	X	-	7.A.2	1650	-	-	Z.A.	1920	-	-	7.A.2	2020	-	-	9	1920	-	0.243	9
1260	-	0.28	7.B.1					2230	X	-	7.A.2	1690	-	-	Z.A.	1950	-	-	7.A.2	2060	-	-	9	1950	-	0.27	9
1290	-	-	7.B.1					2320	X	-	7.A.2	1720	-	-	Z.A.	1980	-	-	7.A.2	2080	-	-	9	2040	-	0.2	9
1340	-	-	7.B.1					2390	X	-	7.A.2	1760	-	-	9	2010	-	-	7.A.2	2100	-	-	9	2120	-	-	9
1460	-	-	7.B.1					2420	X	-	7.A.2	1810	-	-	9	2030	-	-	7.A.2	2120	-	-	9	2150	-	0.15	9
1540	-	-	7.B.1					2470	-	-	6.A	1860	-	-	9	2070	-	-	7.A.2	2160	-	-	9				
1610	X	0.05	7.B.1					2530	X	-	6.A	1900	-	-	9	2100	-	-	7.A.2								
1660	-	0.16	6.A					2540	-	-	6.A					2120	-	-	7.A.2								
1680	-	0.25	6.A					2550	X	-	6.A					2150	-	-	7.A.2								
1740	X	-	7.A.2					2570	-	-	6.A					2180	-	-	7.A.2								
1810	-	0.2	7.A.2													2200	-	-	7.A.2								
1910	-	-	7.A.2													2220	-	-	7.A.2								
1970	X	-	7.A.2													2240	-	-	7.A.2								
2030	-	0.1	7.A.2													2260	-	-	7.A.2								
2050	-	-	7.A.2													2282	-	-	7.A.2								
2140	-	0.17	7.A.2																								

A continuación, se describen las observaciones realizadas a partir de la información obtenida de cada pozo, las cuales se pueden visualizar en las gráficas respectivas de variación vertical de fracturamiento que acompañan a cada pozo.

Para los pozos H43, H50, H52 y H59 no se encontraron datos significativos suficientes en la mayoría de las unidades litológicas, debido a la naturaleza de las muestras que eran muy escasas y/o demasiado reducidas en tamaño, por lo que fue imposible obtener valores lo suficientemente representativos para el análisis. Las gráficas e información adicional relacionadas a estas pueden consultarse en el anexo I.

POZO H5

El pozo H5 fue de gran utilidad, ya que se contó con la mayoría de las muestras utilizables para el estudio. Las muestras en lámina delgada contienen fragmentos con el tamaño mínimo que permite la aplicación de la metodología propuesta, debido a la resolución del escaneo digital. La información del pozo muestra una zona de interés con valores de densidades de fractura mayores a 0.2, indicando un fracturamiento bajo-intermedio en el intervalo de 580 a 730 m de profundidad. Esta zona pertenece a la subunidad 7.B.1, en este intervalo se ha identificado también una zona de alteración mineral después de los 780 m. Por su parte, en el intervalo entre 1210 m y 1310 m de profundidad se observa una correlación entre las densidades de fracturamiento calculadas con las zonas permeables del reservorio (Figura 17); estas zonas han sido indicadas en trabajos previos con fracturamiento inferido. De igual forma, se puede observar que en la zona del pozo que se describe como una zona de alteración con valores máximos (850 m a 1150 m) presenta valores de densidad de fracturamiento bajos (Figura 17), por lo que se puede comprobar la baja permeabilidad existente, lo que posiblemente se deba a que las microfracturas han sido rellenadas por minerales secundarios en este intervalo.

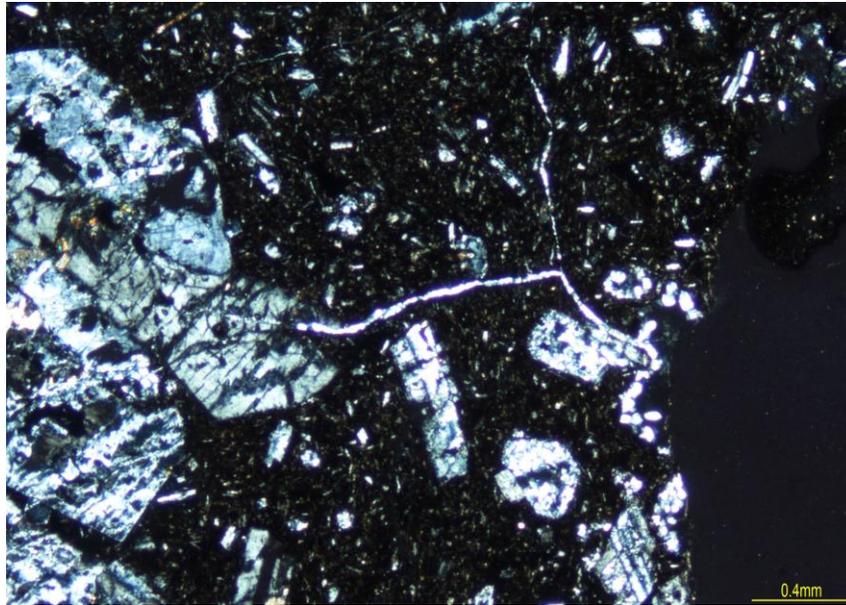


Figura 16 Fotografía de la lámina delgada H5 - 1080 donde se observa una muestra de textura porfídica con fenocristales de plagioclasas, al centro de la imagen se observa cuarzo hidrotermal relleno una fractura.

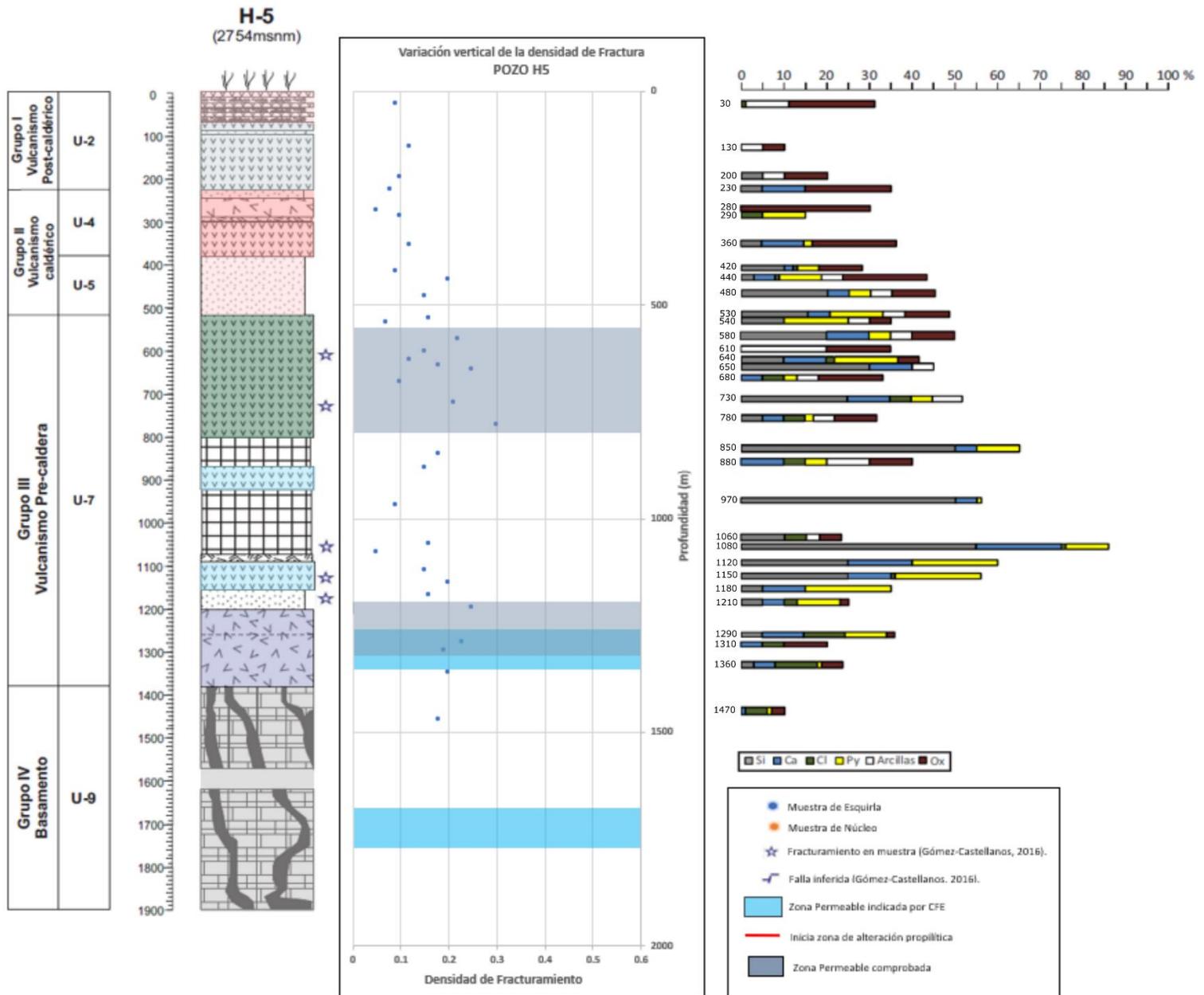


Figura 17. Columna estratigráfica del pozo H5, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Gómez-Castellanos, 2016).

POZO H8

En el pozo H8 se reporta una zona permeable, en el intervalo de 1600 a 1700 m de profundidad (Figura 18), en el cual no fue posible encontrar correlación alguna ya que no se pudieron analizar muestras dentro de esta sección, debido al tamaño de las esquirlas. La existencia de muestras para este pozo fue muy limitada ya que para el pozo H8 solo contó con 17 muestras, de las cuales 15 fueron efectivas para su procesamiento digital.

Las zonas con valores de densidad de fracturamiento relativamente más altos con respecto a la escala propuesta, se indican en el horizonte ubicado a 1310 m perteneciente a la subunidad 7.B.1 y poco antes del inicio de la zona de alteración propilítica. También se indican otras zonas similares en las muestras de 1750 y 1880 m, las cuales pertenecen a la unidad 8 y en un intervalo que va de 2120 a 2150 m de profundidad y que pertenece a la unidad 9 del basamento pre-volcánico.

El pozo H8 contiene la muestra de núcleo con la densidad de fractura más alta calculada en este estudio, con un valor de 0.91 (Figura 18), considerado como muy alto fracturamiento dentro del índice propuesto, la muestra se ubica a 1724 m de profundidad y pertenece al miembro A1 de la unidad 7. El pozo H8 se ubica en el límite de la falla Maztaloya-Los Humeros (Figura 1), por lo que este fracturamiento podría estar relacionado a esa falla.

La zona indicada por CFE como el intervalo de permeabilidad se ubica entre 1600 y 1700 m de profundidad, a partir de los estudios de pérdida de circulación efectuados en este pozo, el cual se ubica muy cerca de la muestra de núcleo H8-1724 (Figura 19), lo que podría sugerir una posible correlación, a pesar de que no se ubica justamente dentro de ese intervalo. Esa ligera discrepancia se debe probablemente al desfase en el registro de profundidades de las esquirlas, que suben con el lodo de perforación.

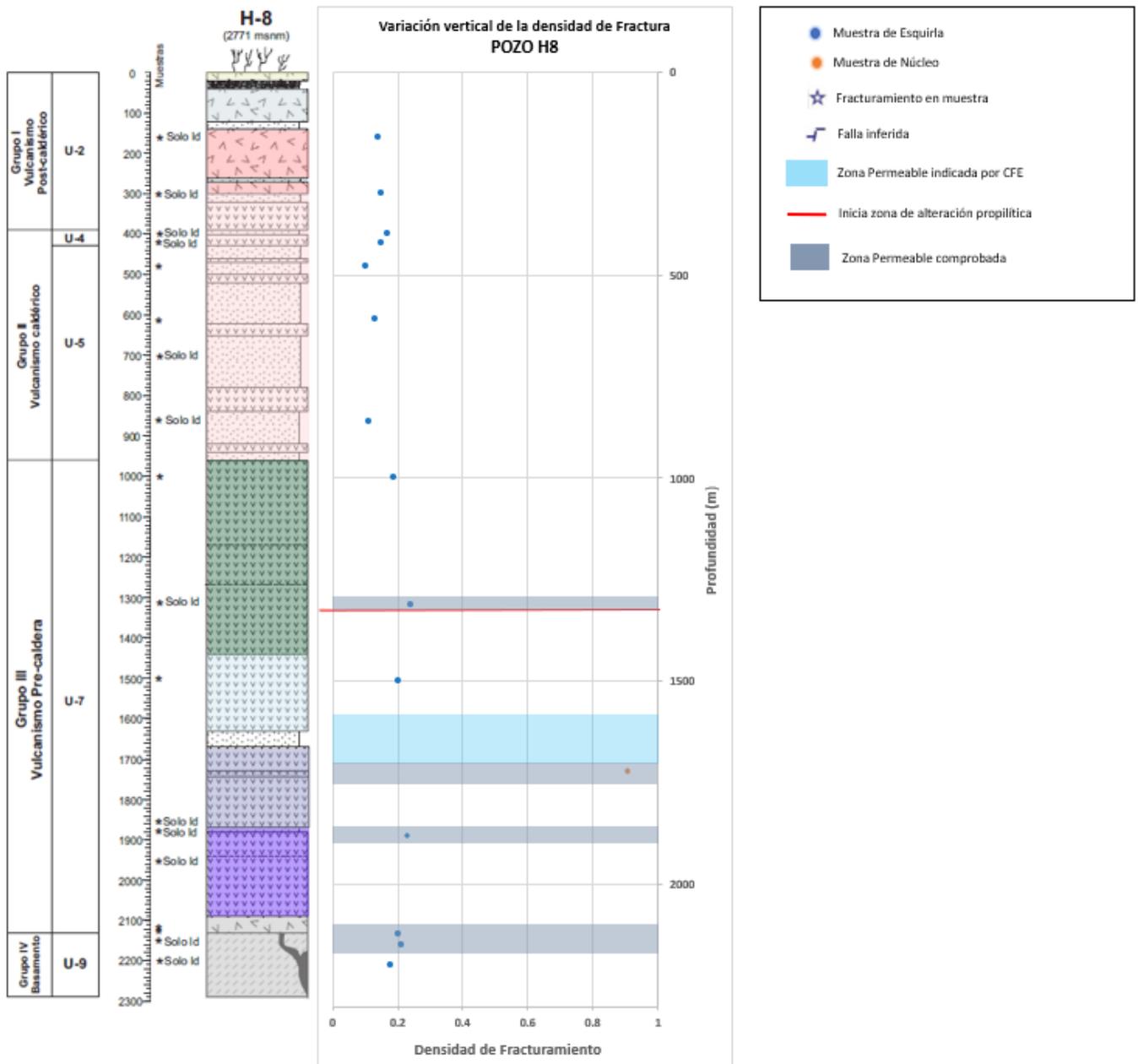


Figura 18. Columna estratigráfica del pozo H8, se muestra la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE. (La columna fue tomada de Carrasco-Núñez et al., 2008; 2017).



1 cm

Figura 19. Muestra de núcleo en lámina delgada del pozo H8 ubicada en el horizonte de los 1724 metros de profundidad y con valor de densidad de fracturamiento de 0.91. El corte muestra un muy alto fracturamiento a lo largo de toda la muestra con posible relación con fallamiento. Es posible observar evidencia de alteración mineral como calcita en la fractura que atraviesa la muestra de lado a lado además de epidota y clorita relleno la mayoría de las fracturas.

POZO H10

La gráfica de variación vertical del pozo H10 (Figura 20) muestra una zona de permeabilidad indicada por CFE en dos intervalos, el primero va desde 1720 hasta los 1900 m, y el segundo va desde 2000 a 2050 m. En lo que respecta al primer intervalo, éste se correlaciona con una muestra de núcleo perteneciente al horizonte de 1825 m, en donde se obtuvo uno de los valores más altos de densidad de fracturamiento y se ubica una zona de alteración dominada por arcillas, calcita y epidota (Peña-Rodríguez, 2018) entre las unidades 7 y 8 de la columna estratigráfica. Los horizontes de mayor densidad de fracturamiento (alrededor de los 1470, 1600 y 1850 m), que pueden representar los horizontes de mayor permeabilidad, indican el inicio de la zona de alteración propilítica (columna derecha en la Figura 20). Debido a la falta de muestras para el procesamiento, no fue posible identificar otras zonas de fracturamiento en la unidad 7.

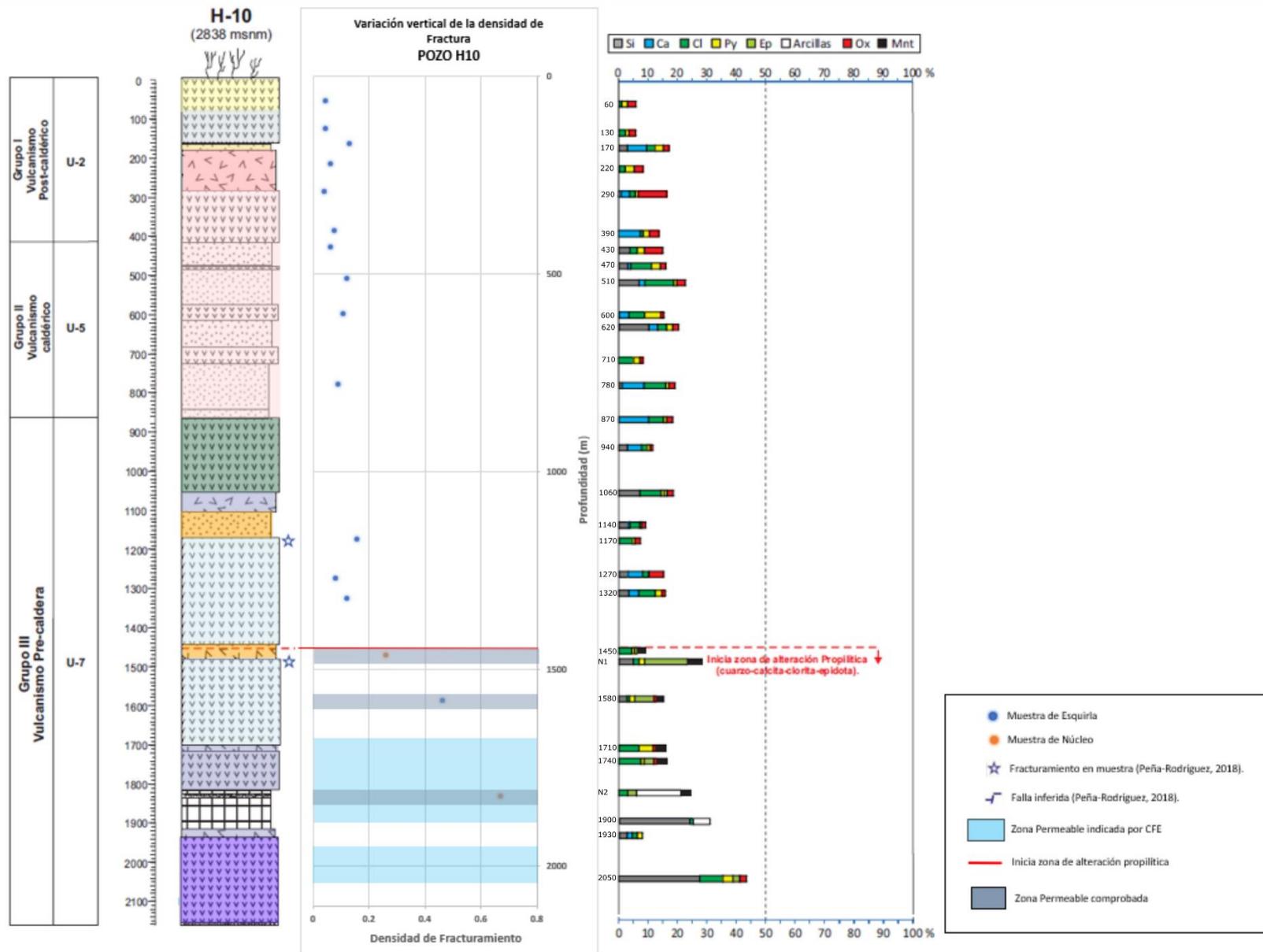


Figura 20. Columna estratigráfica del pozo H10, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Peña-Rodríguez, 2018).

POZO H19

La columna del pozo H19 (Figura 21) muestra una variedad de datos, aunque éstos están ubicados mayormente en los primeros 1000 m de profundidad en el pozo, mostrando una ausencia parcial de información en la parte perteneciente a la unidad 7. Sin embargo, se identificaron datos de bajo fracturamiento en la roca sello, la Ignimbrita Xáltipan, horizonte estratigráfico de la unidad 5. También se calcularon datos de densidad de fractura para intervalos ubicados en la subunidad 7.B.3, que forma parte del paquete andesítico del reservorio geotérmico. El valor máximo de densidad de fracturamiento para el pozo H19 se encuentra en una muestra de núcleo ubicada en el nivel de 1900 m de profundidad y dentro de la zona de alteración, reportada en el intervalo de 1890 a 2080 m. La relación del fracturamiento con la zona permeable del reservorio no muestra una correlación del todo clara en este pozo debido a la escasez de datos.

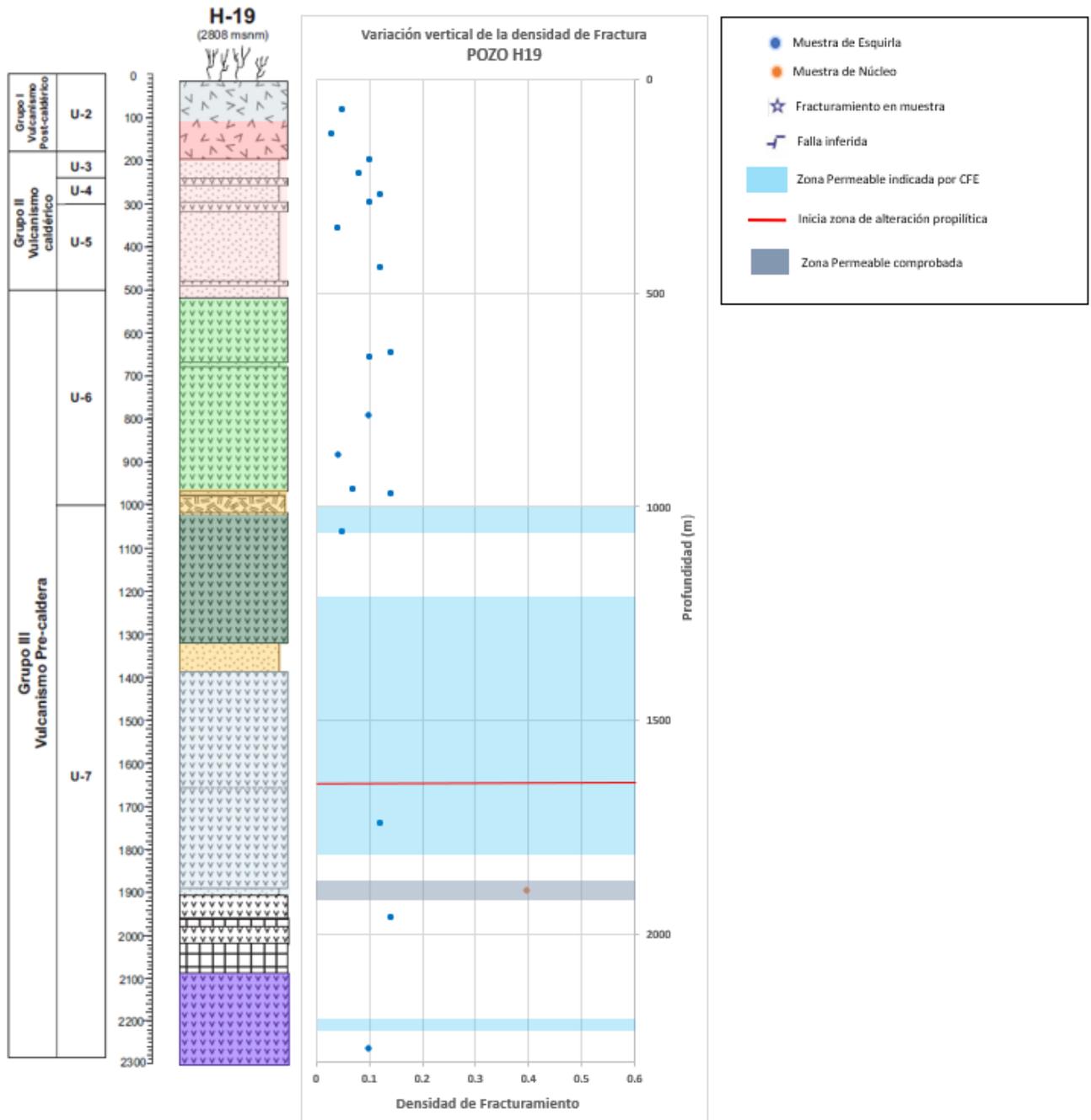


Figura 21. Columna estratigráfica del pozo H19, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE. (La columna fue tomada de Carrasco-Núñez et al., 2008; 2017).

POZO H20

En este pozo se identifican varios niveles con valores de densidad de fracturamiento mayores para este pozo, en donde se destaca el intervalo que va desde 1700 a los 2000 m. En la Figura 22 se muestran los datos de densidad de fracturamiento pertenecientes a la columna estratigráfica del pozo H20; las zonas permeables propuestas por CFE provienen de los datos de pérdida de circulación (gráfica central Figura 22), en este caso se correlacionan muy bien con los datos de fractura obtenidos para este intervalo, además, se corroboran datos de fracturamiento indicados por Acosta-Azúa (2016) en las muestras de núcleo pertenecientes a 1710, 1870 y 2400 m con valores de 0.36, 0.25, y 0.88 respectivamente, indicando valores de bajo-intermedio y muy alto fracturamiento. El pozo H20 ha sido una de las perforaciones más estudiadas, incluyendo también estudios de microtomografía de rayos X (Cid et al., 2021) para conocer sus características de microporosidad y cómo esta influye en la permeabilidad del reservorio. Los estudios llevados a cabo por Cid et al. (2021) reportan que cerca del 80% de la permeabilidad en las rocas volcánicas de este pozo es debido a la interconexión de poros en la escala micrométrica, lo cual ocurre de manera preferencial en el intervalo de 2000 a 2200 m, justo donde no se tiene registro de fracturamiento importante. De hecho, el valor máximo de densidad de fracturamiento se da a una profundidad de 2400 m que coincide con uno de los horizontes permeables identificados por CFE, en donde la microporosidad es reportada como baja (Cid et al., 2021); esto indica que adicionalmente a la densidad de fracturamiento, la microporosidad puede también contribuir a aumentar la permeabilidad, aunque en menor escala.

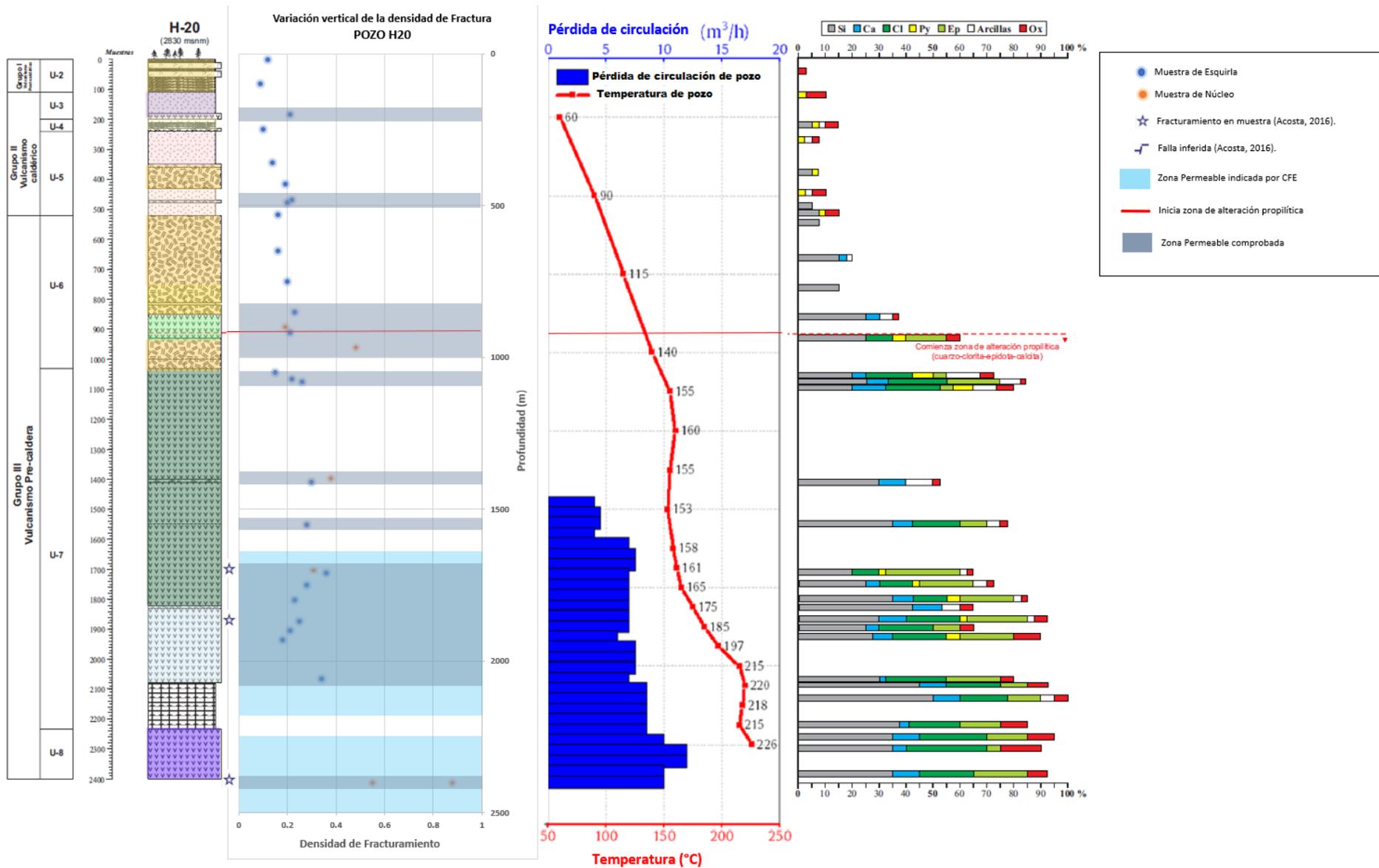


Figura 22. Columna estratigráfica del pozo H20, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, se muestra también la pérdida de circulación en la columna intermedia y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Acosta, 2016).

POZO H25

El pozo H25 muestra una correlación entre la zona permeable propuesta por CFE con dos zonas de fracturamiento previamente indicado. A partir de la petrografía se identificaron previamente dos zonas fracturadas en muestras de esquirlas en los niveles 1440 y 1850 m, el fracturamiento para estas zonas resultó en una densidad calculada de 0.3 y 0.22 respectivamente (Figura 23), por lo que se consideran como zonas de fracturamiento bajo-intermedio dentro de la escala propuesta en este trabajo. La zona permeable indicada por CFE a partir de las pérdidas de circulación se ubica en los niveles pertenecientes a rocas andesíticas de la unidad 7, ubicadas en los intervalos de 1700 a 1800 m y 1900 a 1950 m. Las zonas de permeabilidad inferidas a partir del fracturamiento identificado, ha sido señalado desde el horizonte de los 1360 m, coincidiendo con el inicio de la zona de alteración propilítica identificada en la columna del pozo, en el nivel de los 1440 m. Otra posible zona permeable se asocia con un intrusivo riolítico perteneciente a la subunidad estratigráfica 6.B, en donde se identificaron dos muestras con fracturamiento bajo-intermedio, lo que podría indicar una posible mineralización secundaria. Una tercera zona permeable inferida, fue identificada a aproximadamente 100 m más abajo, en donde se obtuvo el valor más alto de densidad de fracturamiento de todo el pozo a los 1800 m (0.34). Este horizonte coincide con una de las zonas permeables propuestas por CFE.

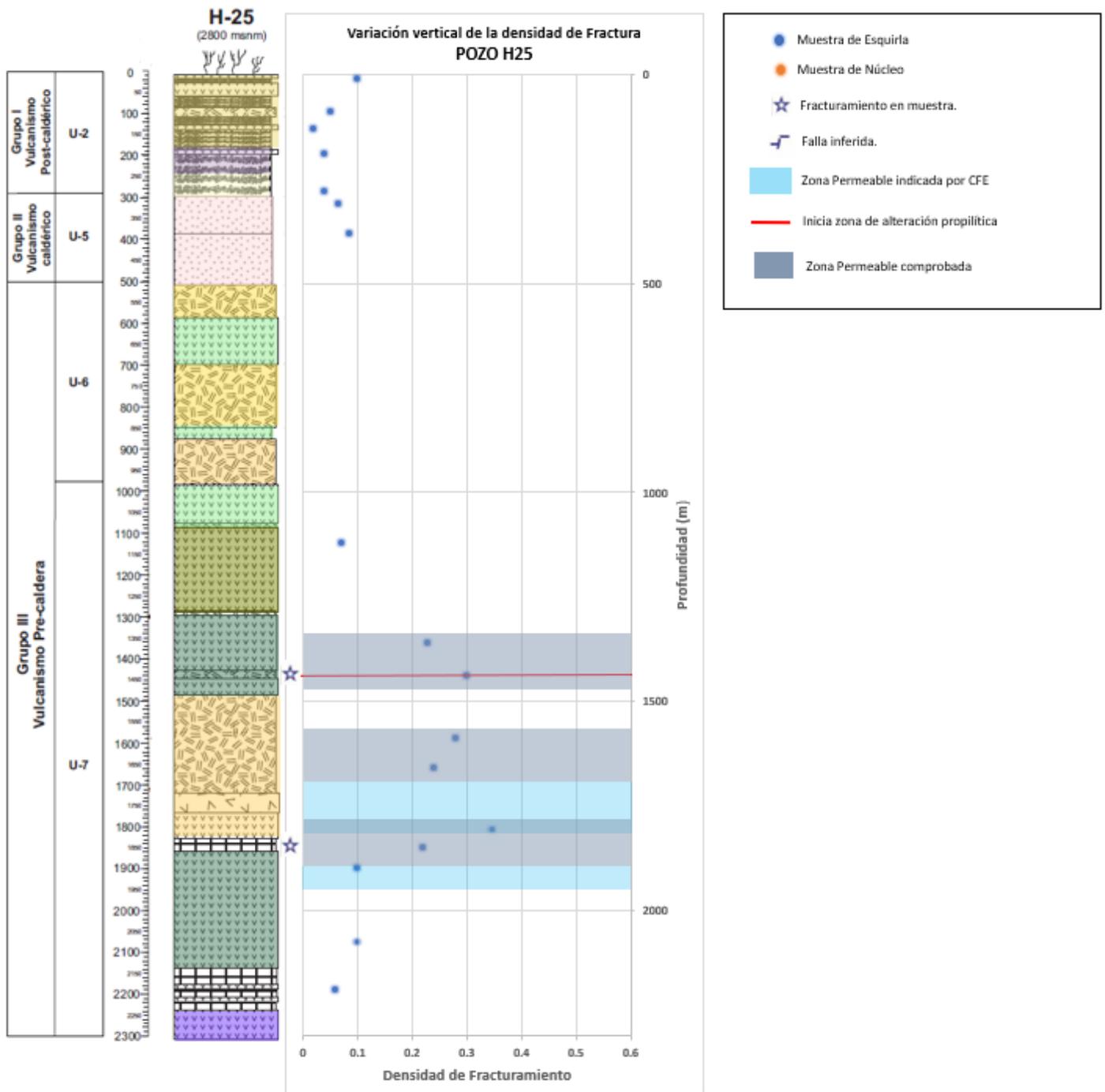


Figura 23. Columna estratigráfica del pozo H25, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, en particular a 1800 m de profundidad. (La columna fue tomada de Galván-Anderson, 2017).

POZO H26

En el pozo H26 se identifican cuatro zonas con fracturamiento bajo-intermedio y dos zonas con fracturamiento intermedio (Figura 24). Las primeras zonas fracturadas se localizan en la unidad 5 (ignimbrita Xáltipan), las zonas de fracturamiento aquí mostradas pueden relacionarse con las zonas no soldadas de la ignimbrita que presentan zonas de permeabilidad baja-intermedia, en contraste con las zonas soldadas típicas de la unidad 5 y que la hacen fungir como una roca de muy baja permeabilidad (revisar apartado 6.3). Las siguientes zonas fracturadas se localizan después de la zona alteración propilítica y una de ellas coincide con una falla inferida identificada por Fernández-Maya (2017), la muestra dio como resultado una densidad de fracturamiento de 0.24, lo que indica fracturamiento bajo-intermedio en ese horizonte, posiblemente afectado por la mineralización secundaria presente en el estrato. Otra muestra con mayor fracturamiento (intermedio) se identificó en la zona de alteración presente alrededor de los 2000 m de profundidad, dentro de un horizonte altamente silicificado, así como también a los 2140 m, correlacionando ambos con la zona de permeabilidad reportada por CFE. En esta zona es difícil distinguir de un fracturamiento secundario debido a los minerales propios de la alteración asociada a los fluidos hidrotermales que circulan en el contacto entre las unidades 7 y 8. Asimismo, a una profundidad de 2300 m se identificó un fracturamiento bajo-intermedio en el miembro 8, aunque éste se encuentra ligeramente debajo de la zona permeable propuesta por CFE.

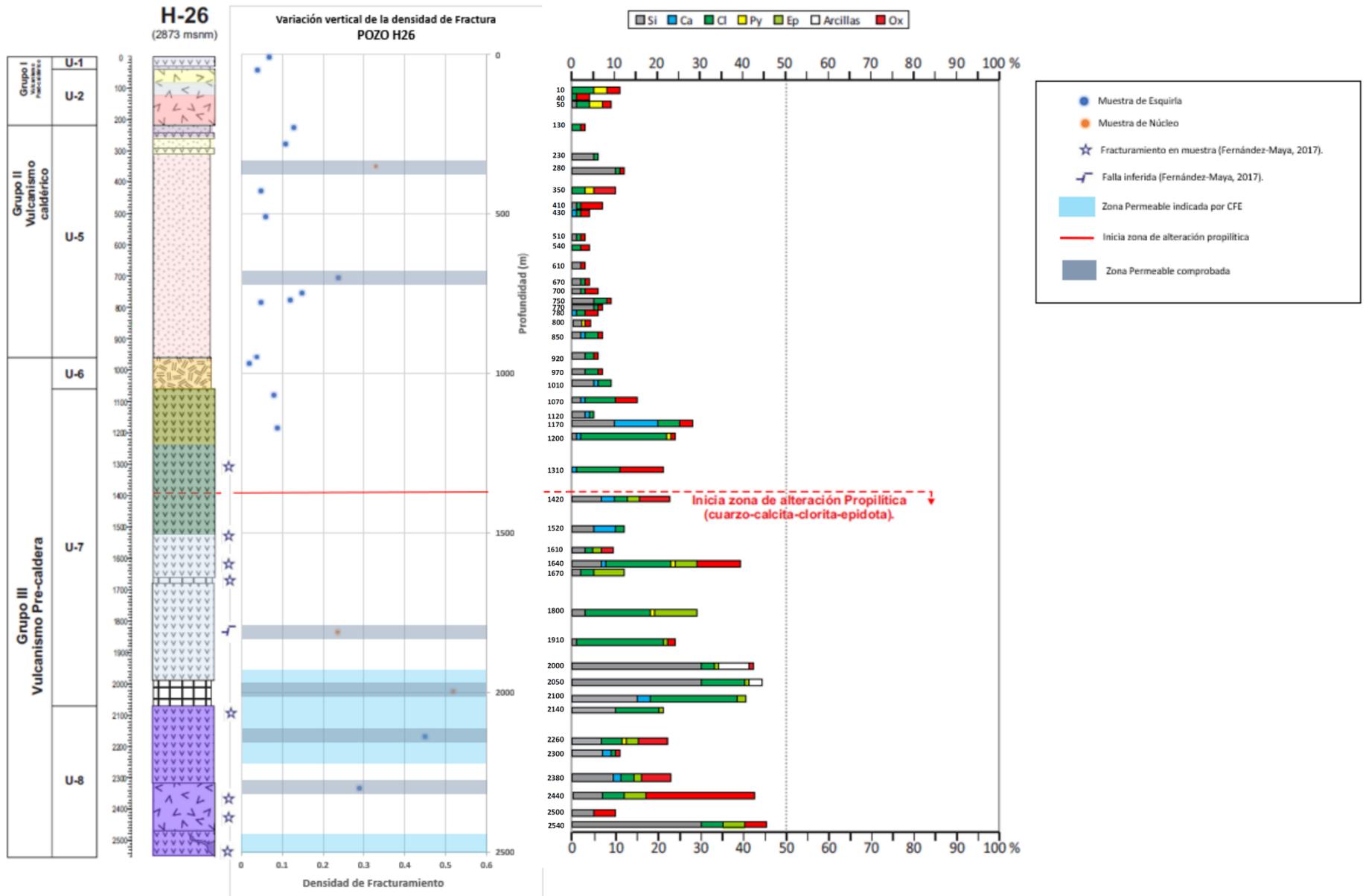


Figura 24. Columna estratigráfica del pozo H26, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Fernández-Maya, 2017).

POZO H42

En el pozo H42 muchas de estas muestras no pudieron ser procesadas. A pesar de esto, la información disponible ha ayudado en la identificación de algunas zonas con posible permeabilidad debida al fracturamiento. Se proponen algunas zonas de interés (especialmente a la profundidad de 700 m), ubicadas en la unidad 5 que agrupa a la Ignimbrita Xáltipan, Toba Faby y la Ignimbrita Zaragoza, correspondiendo posiblemente a zonas con soldamiento bajo-intermedio (Figura 25) (ver apartado 6.3). Se observa un mayor fracturamiento relativo en las zonas superiores, lo que se correlaciona con zonas de menor soldamiento de la ignimbrita Xáltipan. De igual manera, fue posible comprobar algunas zonas de fractura que se habían indicado en la petrografía realizada por Del Pilar-Martínez (2015) también dentro de la unidad 5 en la supuesta roca sello del yacimiento, lo que supone una correlación con la propuesta de Cavazos-Álvarez et al. (2020) quienes justamente proponen que en esas zonas se presenta un soldamiento intermedio para la Ignimbrita Xáltipan.

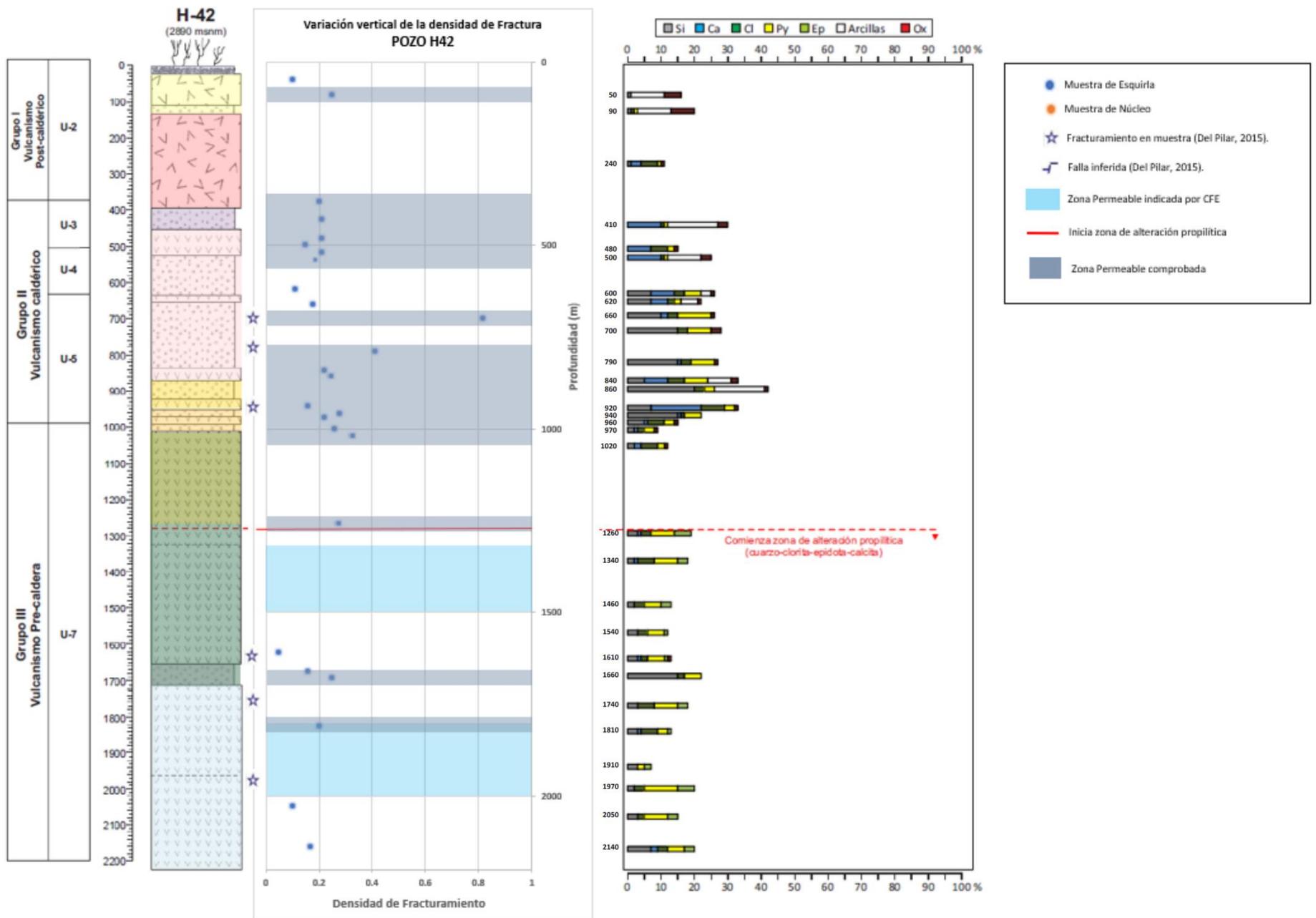


Figura 25. Columna estratigráfica del pozo H42, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Del Pilar, 2015).

POZO H55

En el pozo H55 muestra zonas con fracturamiento bajo, presente en la unidad 5 (Figura 26). Los análisis petrográficos realizados por Carrasco-Núñez y Hernández-Rojas (2016) identificaron microfallas en dos horizontes dentro de la parte superior de la unidad 7, las cuales corresponden con un fracturamiento bajo. El fracturamiento en la unidad 6 (intrusivos riolíticos) es generalmente bajo. En este pozo se identificó una pequeña zona con una densidad de fracturamiento bajo-intermedio (0.25-0.27) en el nivel de 1890-1920 m, que coincide claramente con la zona permeable reportada por CFE (Figura 26).

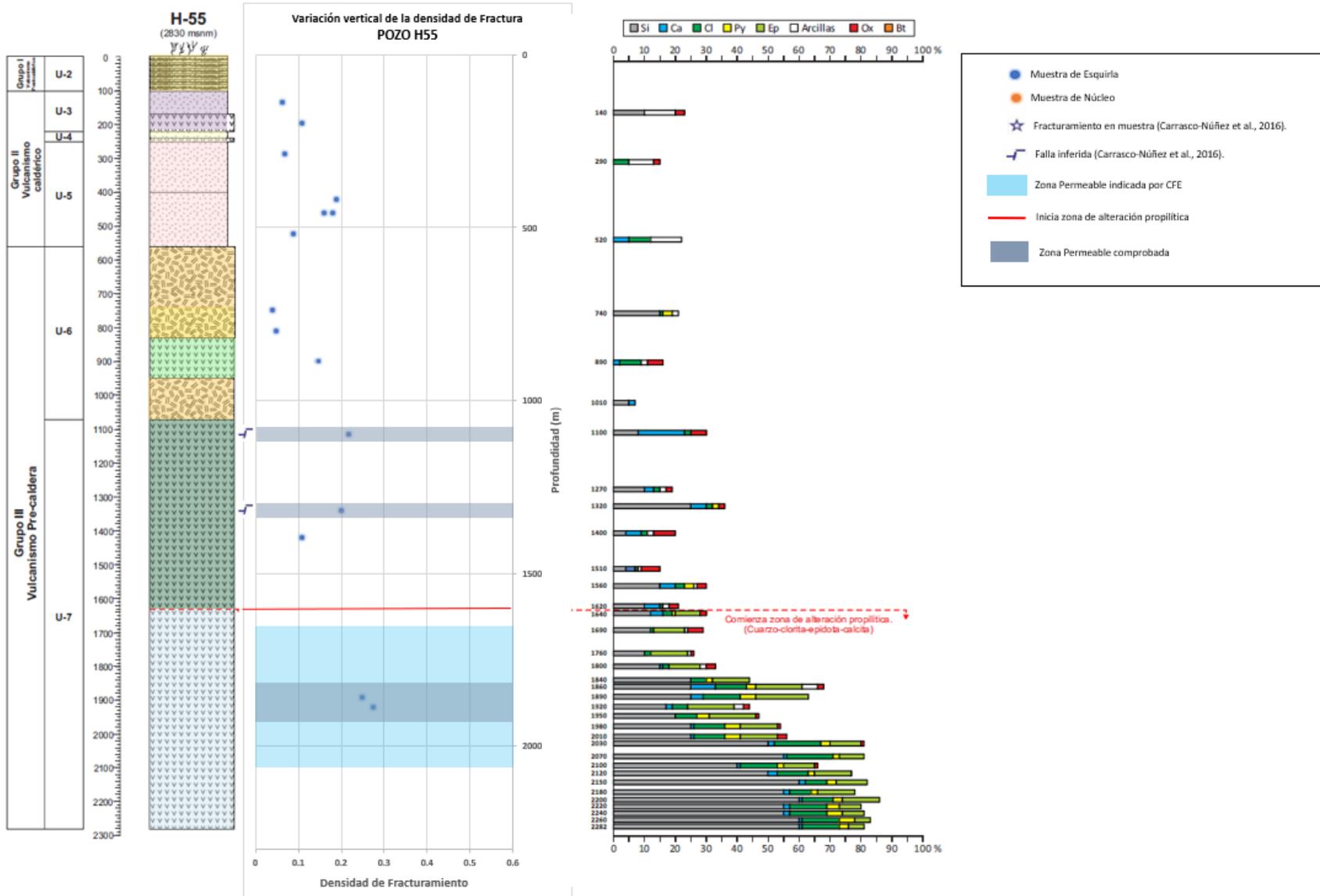


Figura 26. Columna estratigráfica del pozo H55, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica fueron tomadas de Carrasco-Núñez et al., 2016).

POZO H63

La descripción y caracterización estratigráfica del pozo H63 fue realizada por Machorro-Bretón (2018) mediante un análisis de las muestras de esquirla, cuyos tamaños varían entre <0.1 cm a 2cm de diámetro. Este autor indicó fracturamiento en 7 diferentes horizontes y además se señalaron microfallas en 6 zonas, la mayoría dentro del grupo pre-caldérico en la unidad 7, compuesto por un potente paquete andesítico de hasta 1000 m, zona en donde se ubica la parte principal del reservorio. Los horizontes señalados como fracturados se comprobaron y, adicionalmente, se encontraron algunos otros horizontes dentro del mismo paquete litoestratigráfico.

En la Figura 27 se muestran las densidades de fracturamiento calculadas para el pozo H63 junto con las relaciones que existen con fracturas previamente indicadas, con la zona permeable y los datos de pérdida de circulación indicados por CFE.

Se puede observar una correlación muy favorable dentro de la zona permeable reportada por CFE, con los valores más altos de densidad de fracturamiento entre 1250 y 1330 m de profundidad. En este último punto el máximo valor de densidad de fracturamiento es de 0.26, indicando un fracturamiento bajo-intermedio, que se correlaciona con las pérdidas de circulación de hasta 17m³/hr reportadas en los estudios técnicos de CFE. Justamente en esos rangos se reportaron con anterioridad zonas de fracturamiento y pequeñas fallas (Machorro-Bretón, 2018), que se correlacionan con los datos obtenidos en este trabajo. Se observa también, para el rango identificado, que existe mayor contenido de epidota, de acuerdo con lo reportado por Machorro-Bretón (2018). Asimismo, se observa un valor de 0.21 de densidad de fracturamiento a una profundidad de 1680 m que corresponde a una zona de alteración silícica.

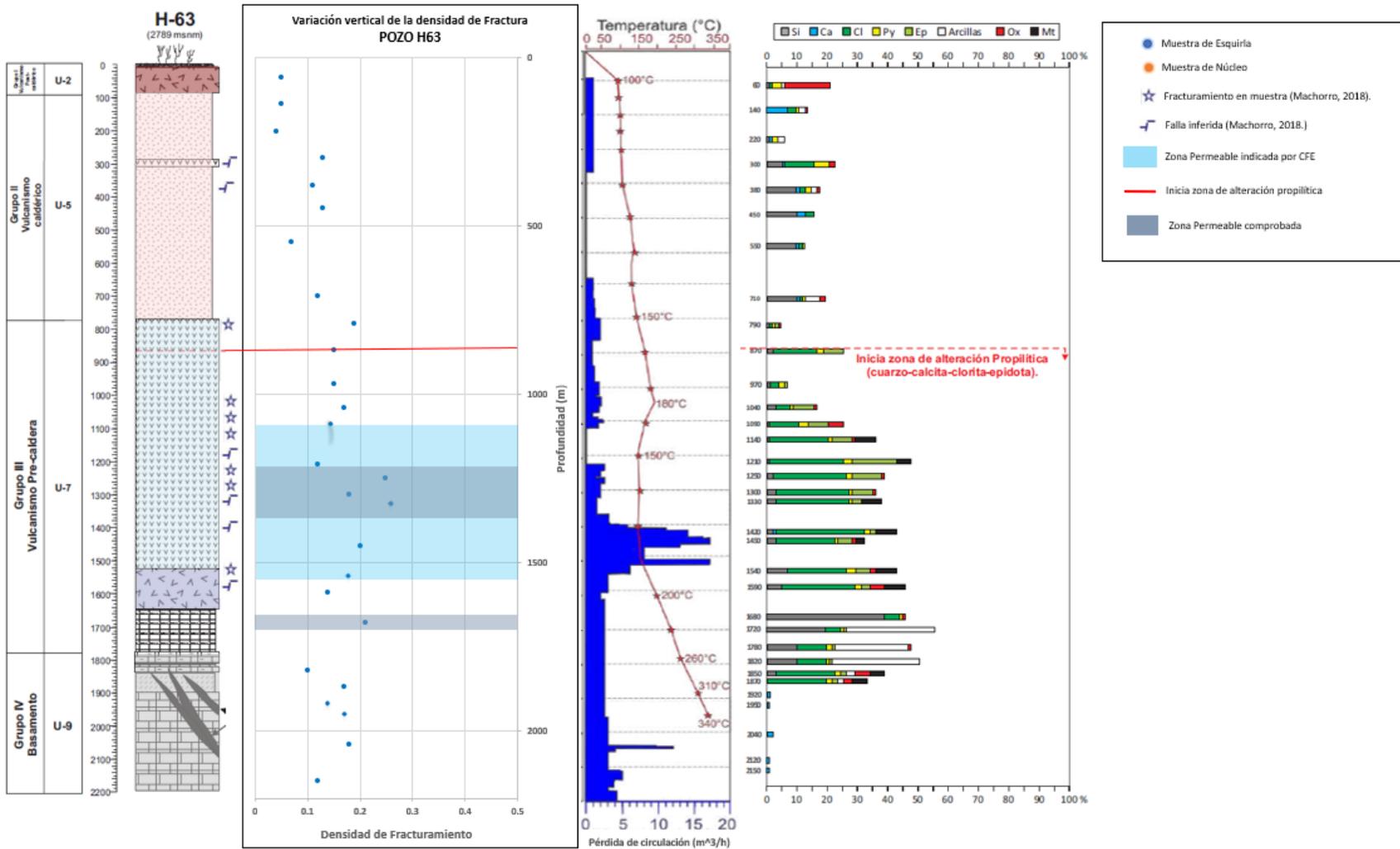


Figura 27. Columna estratigráfica del pozo H63, mostrando la variación vertical de la densidad de fracturamiento y su posible correlación con las zonas permeables inferidas por CFE, se muestra también la pérdida de circulación en la columna intermedia y la alteración hidrotermal en la columna de la derecha. (La columna y la gráfica de alteración fueron tomadas de Machorro-Bretón, 2018).

5.2. Actualización del modelo tridimensional de la geología del subsuelo del Campo Geotérmico Los Humeros

En esta sección se reportan los resultados de la actualización del modelo geológico 3D de las unidades y los nuevos miembros litológicos. También se reportan los resultados de zonas de fracturamiento, identificadas a partir de la interpolación de los datos de densidad de fracturamiento provenientes de las muestras del subsuelo del campo geotérmico.

5.2.1. Modelo geológico actualizado

Los datos para la configuración geológica del subsuelo fueron tomados de la reevaluación estratigráfica realizada por Peña-Rodríguez (2021), presentada en la Tabla 2, con la identificación de miembros litológicos, dentro de las unidades principales del campo geotérmico. Se integró la información disponible de 13 de los 14 pozos que aquí se estudian y gracias al contenido de elementos traza, considerados como inmóviles, se diferenciaron los miembros que anteriormente se consideraban como parte de una misma unidad.

El modelo tridimensional de la zona occidental del Campo Geotérmico de Los Humeros se puede observar en la Figura 28. Se puede apreciar, la irregular distribución de los nuevos miembros litológicos propuestos, que no muestra una continuidad lateral sino más podrían haberse emplazado a través de diferentes fuentes y acomodarse de manera progresiva y modificando el paleorelieve.

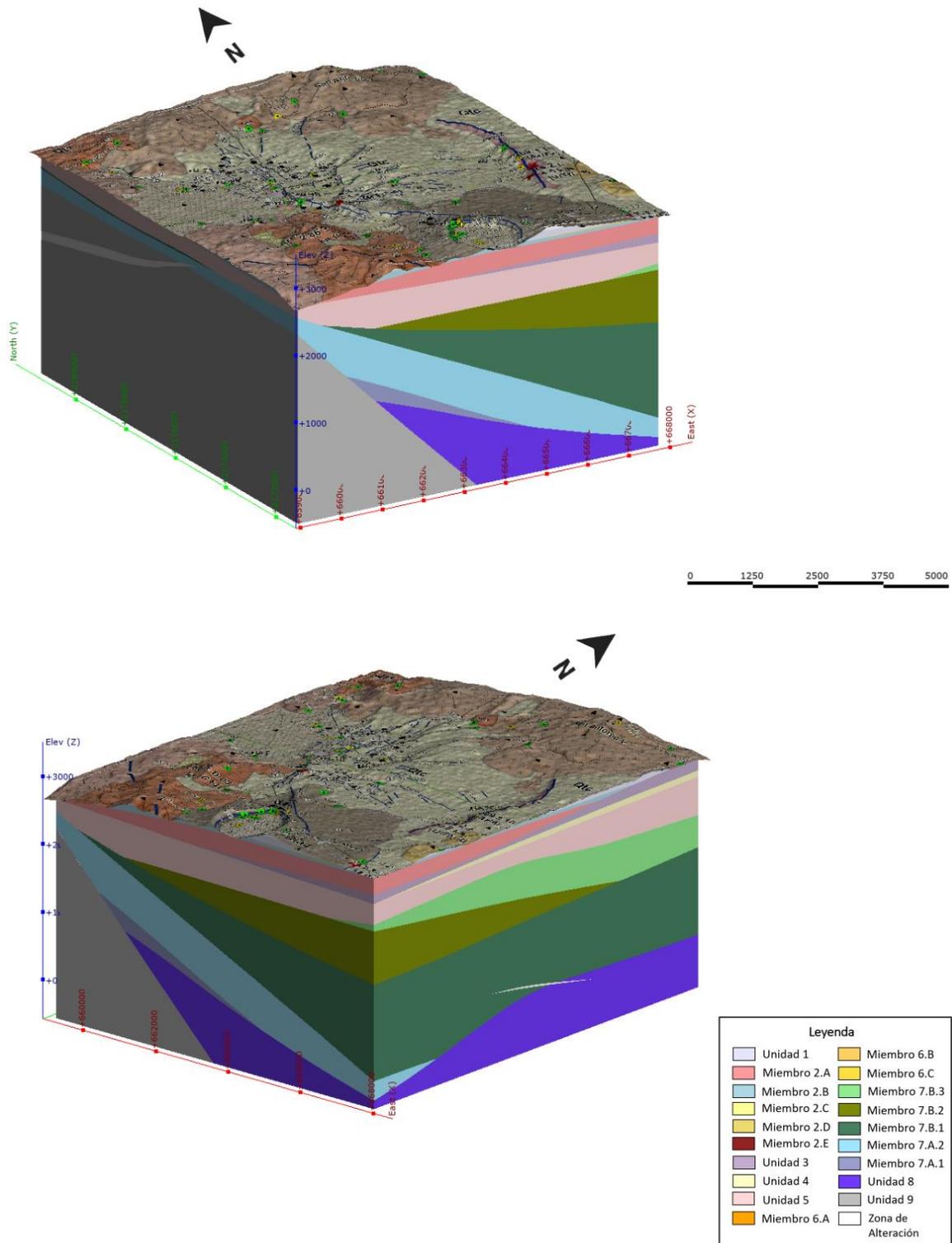


Figura 28. Bloque tridimensional mostrando la configuración geológica de la zona occidental de la caldera de Los Humeros modelada con la herramienta Leapfrog Geo, que incluye las unidades y los miembros propuestos por Peña-Rodríguez (2021). Ver Tabla 2 para la identificación de cada uno de los miembros y unidades litoestratigráficas mostrados en la leyenda.

5.2.2. Modelado tridimensional de la zona de fracturamiento propuesta

Para la identificación de zonas de fracturamiento se interpolaron los datos de densidad de fracturamiento, como un indicador normalizado del fracturamiento obtenido para las muestras de roca provenientes de los pozos geotérmicos seleccionados para este trabajo. Con base en el modelo previo de la caldera y con los ajustes estratigráficos actualizados, el resultado generado fue el modelo tridimensional de una parte del subsuelo del campo que indica zonas con posible fracturamiento dentro del reservorio geotérmico (Figura 29). La interpolación de los datos de densidad de fracturamiento en el modelo dio como resultado una zonificación o diferenciación de zonas, mostrando un mayor o menor grado de fracturamiento, según la escala propuesta en la metodología, predominando los datos de fracturamiento bajo-intermedio como valores de interés para su consideración como zonas de potencial permeabilidad. Al tener una cantidad de datos menor en los otros rangos, indican sólo algunas zonas puntuales y volúmenes menores. Los puntos que indican un fracturamiento alto (>0.8 , en color rojo Figura 28) se ubican en pozos que han sido perforados en cercanía con el plano de alguna de las varias fallas identificadas que atraviesan el campo.

La visualización tridimensional del modelo permite sobreponer los resultados de la densidad de fracturamiento con las zonas permeables estimadas por CFE y reportadas en el modelo previo de la caldera de Los Hornos (Fernández-Maya, 2021), encontrando una buena correlación para la mayor parte de los resultados, como se discutirá más adelante.

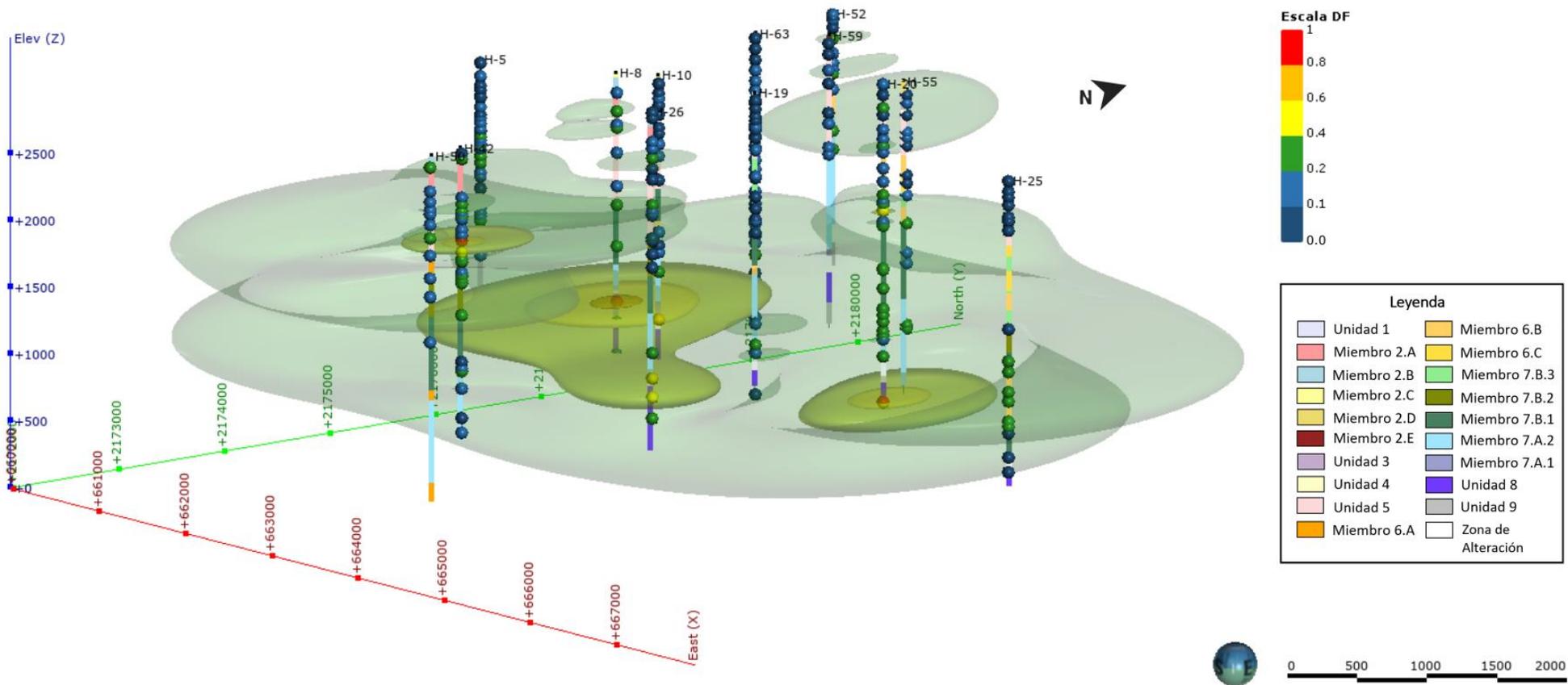


Figura 29. Interpolación de los datos de densidad de fracturamiento en el modelo 3D del subsuelo. Se destaca la mayor proporción de datos (DF) con valores entre 0.2 y 0.4 (en color verde), que corresponden a zonas de fracturamiento definido como bajo-intermedio.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

En este apartado se discuten las relaciones existentes entre las zonas de fracturamiento identificadas en este trabajo con las inferidas en los trabajos de caracterización geoquímica y petrográfica de las muestras provenientes de los pozos geotérmicos, además de otras correlaciones importantes.

6.1. Correlación de las unidades litoestratigráfica del subsuelo del CGLH con el fracturamiento

Los resultados de este estudio han permitido reevaluar y cuantificar gran parte de las zonas de fracturamiento en el subsuelo del CGLH, corroborando los resultados de los distintos reportes petrográficos realizados con anterioridad. En estos se identifican horizontes fracturados a partir de las muestras de roca, e incluso en las que presentan evidencia de microfalla. Todas las fracturas y microfallas indicadas en la petrografía, fueron verificadas en el presente estudio.

En el pozo H63 (Figura 27), se muestran numerosas zonas fracturadas inferidas y algunas también con evidencias de microfallas obtenidas de la caracterización petrográfica realizada por Machorro-Bretón (2018). La mayoría de las evidencias de fractura y fallamiento se identificaron inicialmente en la unidad 7, la cual forma parte del Grupo III de la caldera, denominado como vulcanismo pre-caldérico. De acuerdo con la nueva estratigrafía propuesta por Peña-Rodríguez (2021), ahora las muestras han sido ubicadas dentro del miembro 7.A.2 y otra parte en el miembro 7.A.1 (Tabla 2); además de estas, otras zonas que indican microfallas se ubican en la unidad 5 dentro de la Ignimbrita Xáltipan (vulcanismo caldérico).

A lo largo del análisis de las muestras de pozos, se consideraron también las secuencias fracturadas reportadas por otros autores y se compararon con las densidades de fracturamiento obtenidas en este trabajo. Con esto, se han podido corroborar las zonas de fractura existente y, además, otorgar un valor cuantitativo al fracturamiento previamente identificado.

Se seleccionaron 2 perfiles representativos, en función de los resultados obtenidos, con la finalidad de mostrar las variaciones laterales de las unidades y miembros litoestratigráficos

en el subsuelo del campo geotérmico, con el objetivo de identificar relaciones del fracturamiento de distintos niveles estratigráficos (Figuras 30 y 31). No se observa una continuidad sistemática de la densidad de fracturamiento correlacionable con las diferentes unidades estratigráficas.

Se propone que la zona de mayor permeabilidad del reservorio geotérmico se encuentra albergada principalmente dentro de la unidad 7, aunque es posible que también existan condiciones locales de permeabilidad media en otras unidades como en las 8, 6 y parte de la unidad 5 (Ignimbrita Xáltipan). Sin embargo, la falta de continuidad lateral de los miembros identificados como parte de la unidad 7, podría explicar que las condiciones de fracturamiento y permeabilidad no sean continuos, sino que presentan importantes cambios laterales y verticales. Los perfiles muestran cómo la densidad de fracturamiento calculada parece incrementarse en las zonas que se han identificado como las zonas permeables del reservorio geotérmico, y dónde estudios previos parecen constatar la presencia de alta permeabilidad de este paquete rocoso, en dichos niveles estratigráficos.

VARIACIÓN VERTICAL DE LA DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO

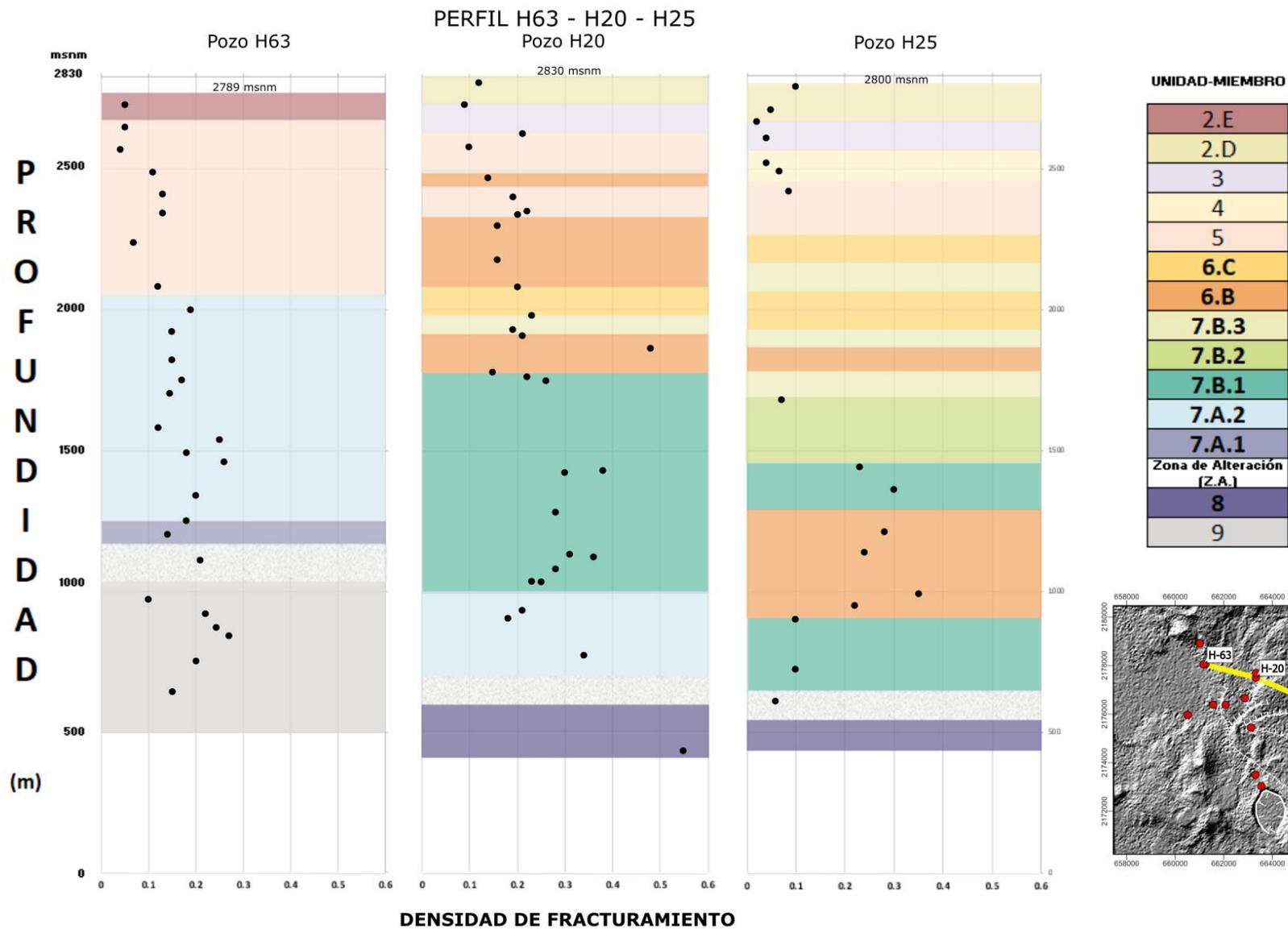


Figura 30. Perfil que muestra las columnas litoestratigráficas de los pozos H63, H20 y H25, ubicados en la dirección NW – SE, mostrando las variaciones verticales y laterales de la densidad de fracturamiento de acuerdo con la estratigrafía propuesta por Peña-Rodríguez (2021).

VARIACIÓN VERTICAL DE LA DENSIDAD DE FRACTURAMIENTO

PERFIL H63 - H10 - H26

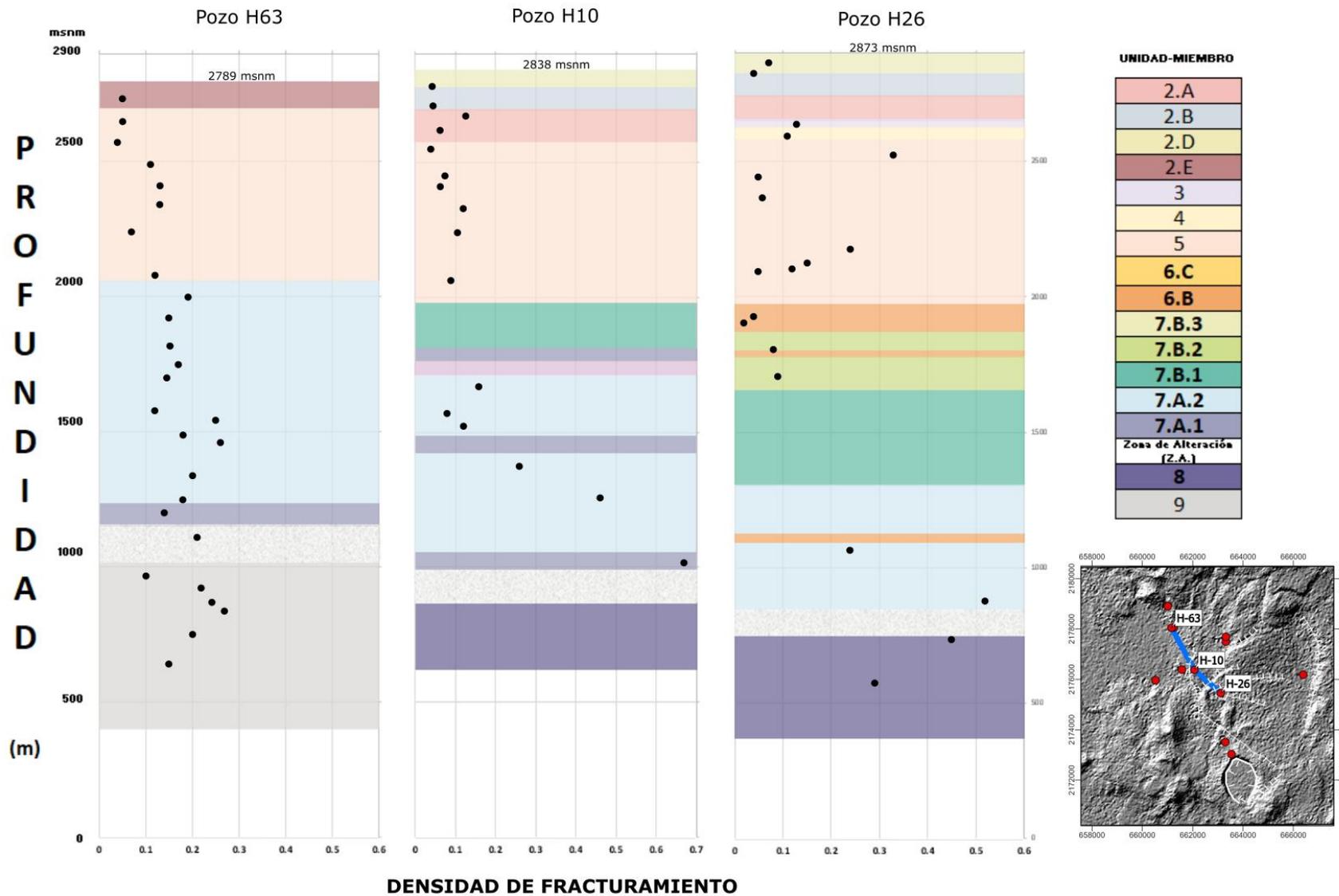


Figura 31. Perfil que muestra las columnas litoestratigráficas de los pozos H63, H10 y H26, ubicados en la dirección NW – SE, mostrando las variaciones verticales y laterales de la densidad de fracturamiento de acuerdo con la estratigrafía propuesta por Peña-Rodríguez (2021).

6.2. Correlación de la densidad de fracturamiento con las facies de soldamiento en la Ignimbrita Xáltipan

Con el objetivo de ampliar el alcance de este estudio, en este apartado se hace una discusión de la relación existente entre los valores de fracturamiento determinados para los estratos pertenecientes a la Ignimbrita Xáltipan, de acuerdo con su grado de soldamiento. Este paquete estratigráfico, que conforma la unidad 5, es el resultado de los eventos formadores de caldera, siendo este uno de los mayores eventos volcánicos registrados dentro del Cinturón Volcánico Transmexicano. Dicha erupción volcánica resultó en el colapso de la Caldera Los Humeros y conforma la estructura principal que contiene al sistema geotérmico (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011). La Ignimbrita Xáltipan se superpone directamente sobre el paquete fracturado de la sucesión andesítica emplazada en los eventos pre-caldéricos y que conforma en su mayoría la parte de mayor permeabilidad del reservorio. Comúnmente se ha considerado que la ignimbrita Xáltipan corresponde con la roca sello del reservorio geotérmico del CVLH (Cedillo, 2000); sin embargo, resultados recientes derivados del análisis de sus características físicas (Cavazos-Álvarez et al., 2020) permiten afirmar que existen variaciones importantes de permeabilidad tanto verticales como laterales asociadas a sus distintas facies de soldamiento.

Según Cavazos-Álvarez et al. (2020), la ignimbrita Xáltipan puede dividirse en tres facies, de acuerdo con su grado de soldamiento: a) Facies basal, que representa la facies con un grado de soldamiento fuerte; b) Facies media, con soldamiento moderado y, c) Facies superior, con un leve o nulo soldamiento. Se busca establecer una relación entre estos horizontes con material más o menos consolidado con los índices de fracturamiento obtenidos en este trabajo.

En la Figura 32 se observa la variación de los valores de densidad de fracturamiento de los horizontes pertenecientes a la Ignimbrita Xáltipan. Aunque no se observa un patrón evidente de variaciones de la densidad de fracturamiento, es posible establecer ciertas relaciones que, muestran tendencia a un fracturamiento mayor en la facies basal (soldada) de la ignimbrita, en comparación son las facies superiores (intermedia y poco soldada). La variación de la densidad de fracturamiento oscila entre el 0.04 y el 0.81 en la Ignimbrita Xáltipan, en la

mayoría de los pozos indican mayor fracturamiento conforme se desciende estratigráficamente hacia las zonas que se caracterizan por tener un mayor soldamiento.

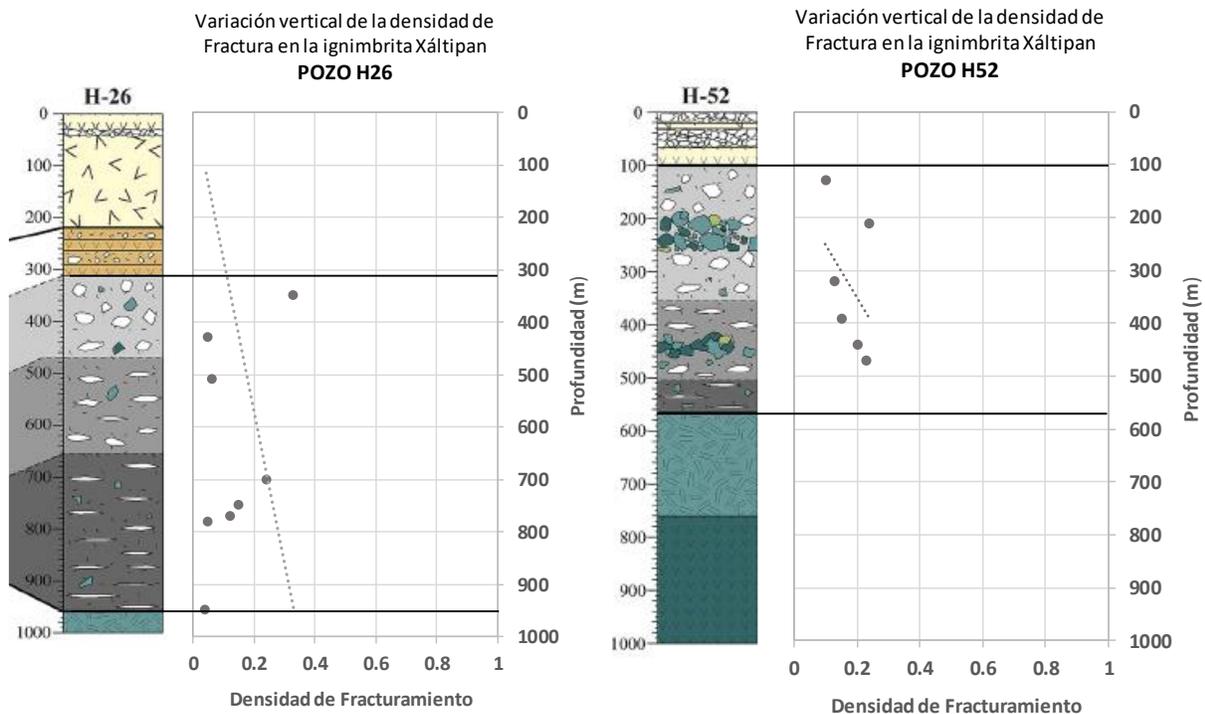


Figura 32. Variación vertical de la densidad de fracturamiento en la unidad 5 perteneciente a la Ignimbrita Xáltipan en los pozos H26 y H52. Modificada de Cavazos-Álvarez et al. (2020).

Las facies basales, al ser un material consolidado, pueden presentar deformación frágil propenso al fracturamiento, en contraste con las facies media y superior compuestas por material menos consolidado, que presenta un comportamiento pseudo-dúctil de materiales granulares que pueden acomodar la deformación al ser sometidos a un esfuerzo, sin generar planos evidentes de fractura. Por otra parte, Cavazos-Álvarez et al. (2020) indican que las variaciones petrofísicas en la ignimbrita también están controladas por el grado de soldamiento y por la mineralización secundaria. Finalmente, el trabajo de correlación de estas facies puede comprobar lo que mencionan Cavazos-Álvarez et al. de (2020), ya que con base en los estudios de la petrofísica de este paquete piroclástico reportan que el fracturamiento es menor en la facies superior, a diferencia de lo observado en las facies media y basal, donde el fracturamiento aumenta, en términos generales, a la par con el soldamiento de la ignimbrita.

Cabe resaltar que algunos puntos de alta densidad de fracturamiento encontrados coinciden con las facies soldadas, como por ejemplo la muestra más somera del pozo H26 y la muestra del pozo H52 ubicada alrededor de los 200 m de profundidad (Figura 32). Esto puede explicarse con la existencia de zonas con brechas en la secuencia de la unidad 5, las cuales contienen líticos accidentales procedentes del colapso de material de zonas distales al momento de la erupción. Esto se ha comprobado gracias a estudios petrográficos y geoquímicos de muestras de lava de seis pozos en el campo (Cavazos-Álvarez et al., 2020).

6.3. Correlación del fracturamiento en el modelo 3D con la zona de alta permeabilidad

La zona de alta permeabilidad propuesta por Fernández-Maya (2021) fue definida a partir de los datos de pérdida de circulación de fluidos proporcionados por CFE. La zona de fracturamiento que se presenta en esta tesis fue elaborada mediante la interpolación de los datos de densidad de fracturamiento resultado del análisis de las muestras de núcleo, aplicando el software *Leapfrog Geo*. En este apartado se hace un análisis de la correlación entre la zona de alta permeabilidad que propone Fernández-Maya (2021) y la zona de fracturamiento propuesta en el presente trabajo del campo geotérmico Los Humeros.

La Figura 33 muestra la configuración de distribución propuesta de las dos zonas mencionadas, por un lado, la zona de fracturamiento inferida a partir de las densidades de fracturamiento y, por otro lado, la zona de posible permeabilidad inferida por pérdida de circulación de fluidos. Con el fin de visualizar con mayor claridad los sitios en donde se traslapan ambas zonas, se presentan diferentes secciones desde posiciones distintas. La identificación de zonas de traslape es de gran relevancia para corroborar la posible relación entre el fracturamiento y la permeabilidad.

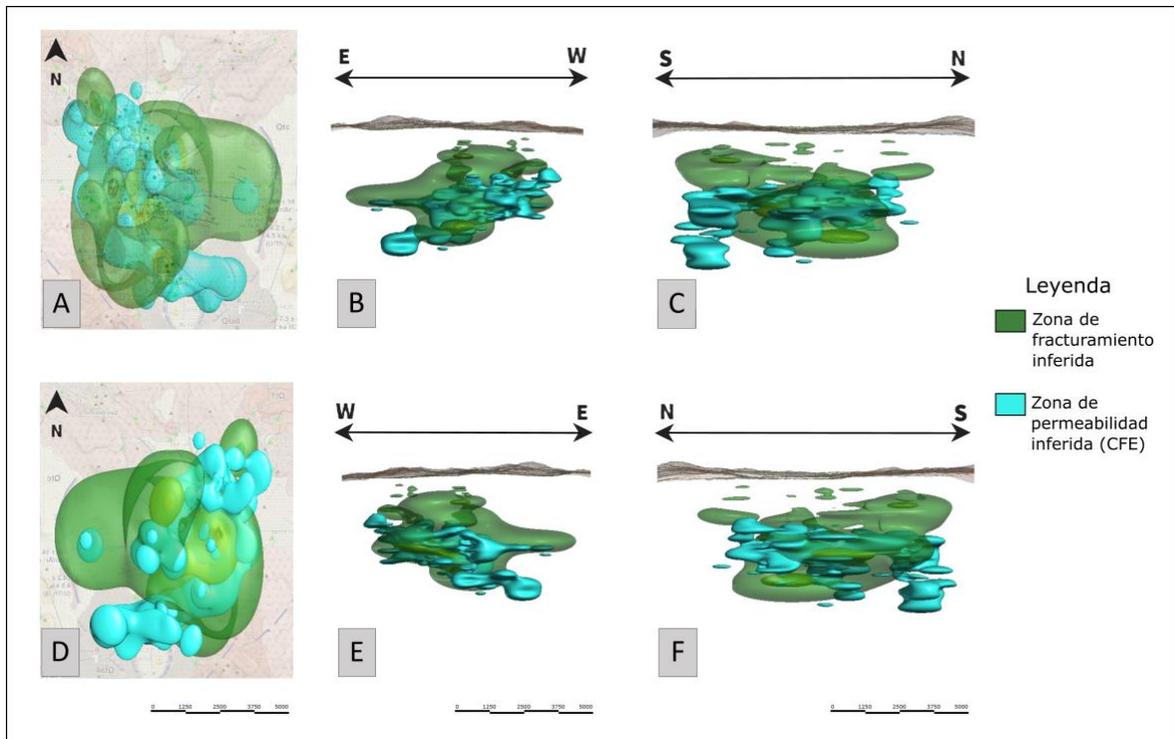


Figura 33. Visualización 3D de las zonas superpuestas de fracturamiento y alta permeabilidades reportadas. A) Vista superior o en planta de la zona modelada. B) Perfil EW, con vista desde el norte en dirección sur. C) Perfil SN, con vista desde el este. D) Vista inferior. E) Perfil WE, con vista desde el sur. F) Perfil NS, con vista desde el oeste.

Fernández-Maya (2021) propuso dos zonas principales de posible permeabilidad, una al norte del CGLH que abarca los pozos H63, H52, H43 en un perfil con dirección a los pozos H55 y H20 (Fig. 34a y 34b), y otra en la zona del perfil que engloba a los pozos H50 y H42 al sur del CGLH (Fig. 34c y 34d).

Al sobreponer las dos zonas, se identificó una concordancia entre una buena parte de los datos de densidad de fracturamiento con la zona de permeabilidad reportada en el modelo propuesto por Fernández-Maya (2021) (Figura 34a). Aunque existe una buena correlación entre ambas zonas, cabe destacar que una de las dos secciones presentadas en la Figura 33, la sección B-B' que muestra varios intervalos de posible permeabilidad, no ha coincidido con la zona de facturamiento (Figura 34c). La diferencia en la sección B-B' puede ser resultado de la falta información proveniente de otros pozos, ya que para la interpolación de la zona de alta permeabilidad se utilizaron algunos pozos que no fueron objeto de estudio en este trabajo. A partir de la zona de fracturamiento se podrían proponer áreas proximales que pudieran ampliar el rango de las exploraciones y que complementen los datos previos de permeabilidad a partir de la nueva información.

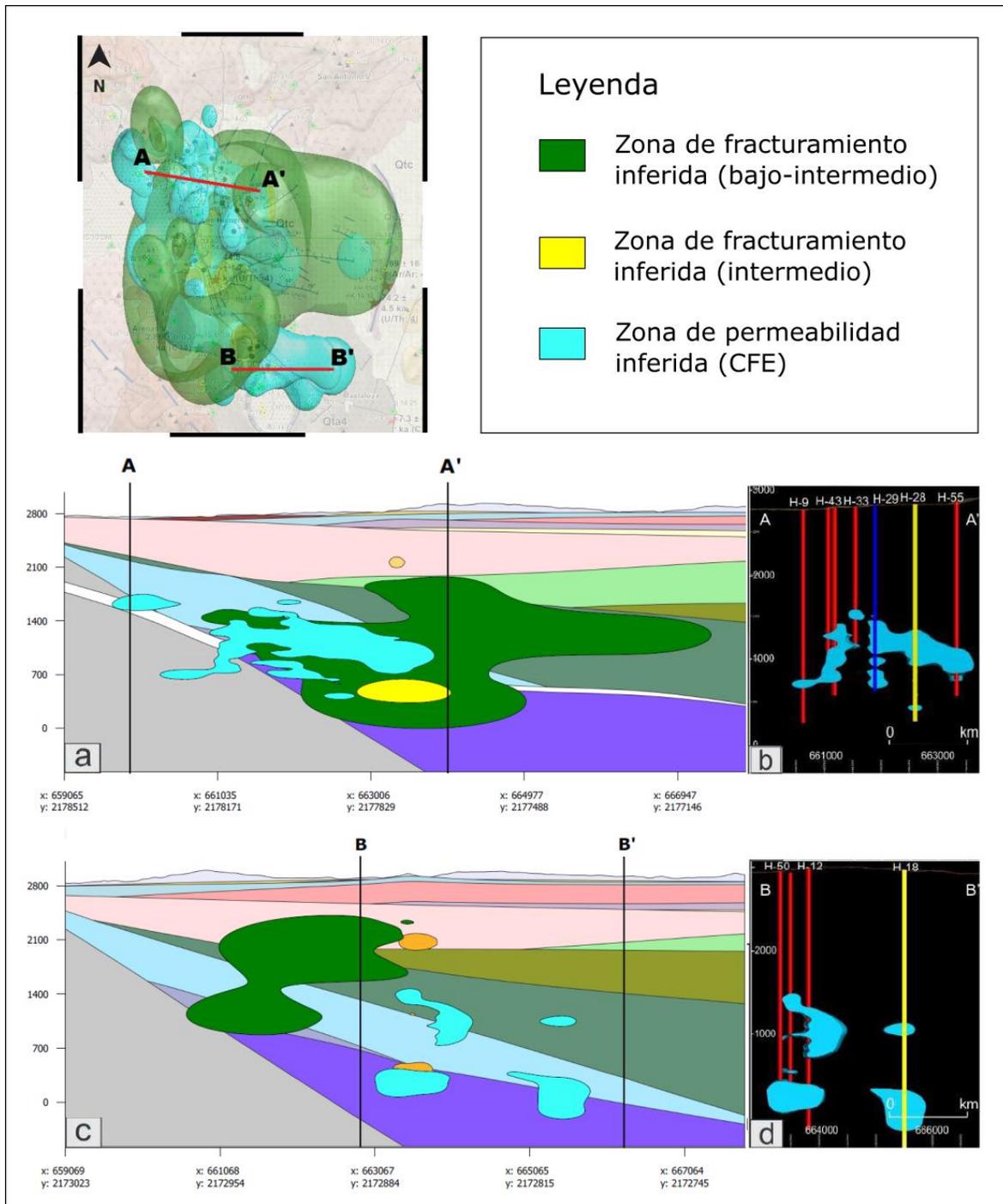


Figura 34. Secciones que muestran la distribución general de las zonas de fracturamiento y de alta permeabilidad en las secciones reportadas dentro del reservorio. Modificado de Fernández-Maya (2021). Mapa mostrando la ubicación de las secciones y la distribución en planta de ambas zonas. a) Sección A-A', se muestra la concordancia entre los datos de densidad de fracturamiento y la zona de permeabilidad inferida con datos de CFE. b) Muestra la sección A-A' de la zona de permeabilidad modelada por Fernández-Maya (2021). c) Sección B-B', muestra la diferencia entre la zona de fracturamiento y la zona de permeabilidad inferida con datos de CFE. d) Muestra la sección B-B' con las zonas de permeabilidad modeladas por Fernández-Maya (2021).

En la Figura 35 se puede observar un corte transversal en el campo con dirección W-E, en el cual se muestra como la zona de fracturamiento interpolada contiene en su mayoría a la zona de permeabilidad. Estos puntos donde existe una mayor concordancia entre ambas zonas han servido para proponer las nuevas zonas de alta permeabilidad en el subsuelo del campo.

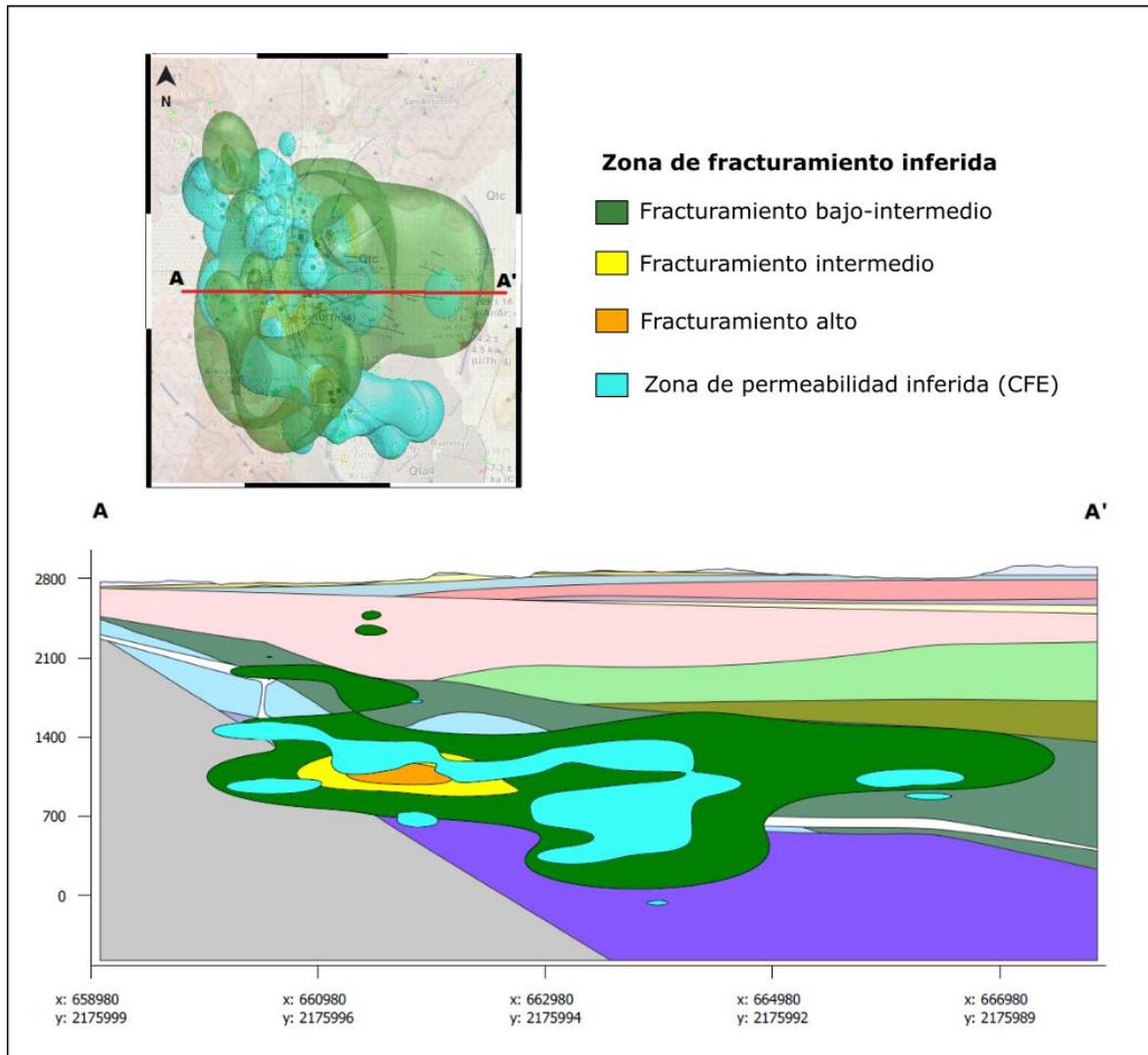


Figura 35. Sección que muestra un perfil del campo con dirección W-E, donde se puede ver la correlación entre la zona de fracturamiento y la zona de permeabilidad.

En la sección central del modelo fue posible identificar una zona donde se observa la mayor concordancia entre el fracturamiento y la zona de alta permeabilidad inferida, dirección EW del CGLH (Figura 36). Puede sugerirse como el área con los intervalos más grandes de zonas con alta permeabilidad dominada principalmente por fracturas. Esto puede deberse principalmente a la convergencia de las principales y más extensas fallas del campo, las

cuales se extienden de norte a sur y desde la zona central hacia el poniente de la caldera de Los Potreros. Existe además una zona de fracturamiento aislada en el extremo oriental de la zona de estudio, en donde se identificó una buena concordancia entre valores de alta permeabilidad reportados por CFE y los datos de densidad de fracturamiento. Por otro lado, la zona de permeabilidad reportada por Fernández-Maya (2021), ubicada en el extremo sur del campo geotérmico, no pudo ser verificada con los datos interpolados de fracturamiento, debido a la falta de información para este sector del campo dónde se ubican específicamente los pozos H42 y H50.

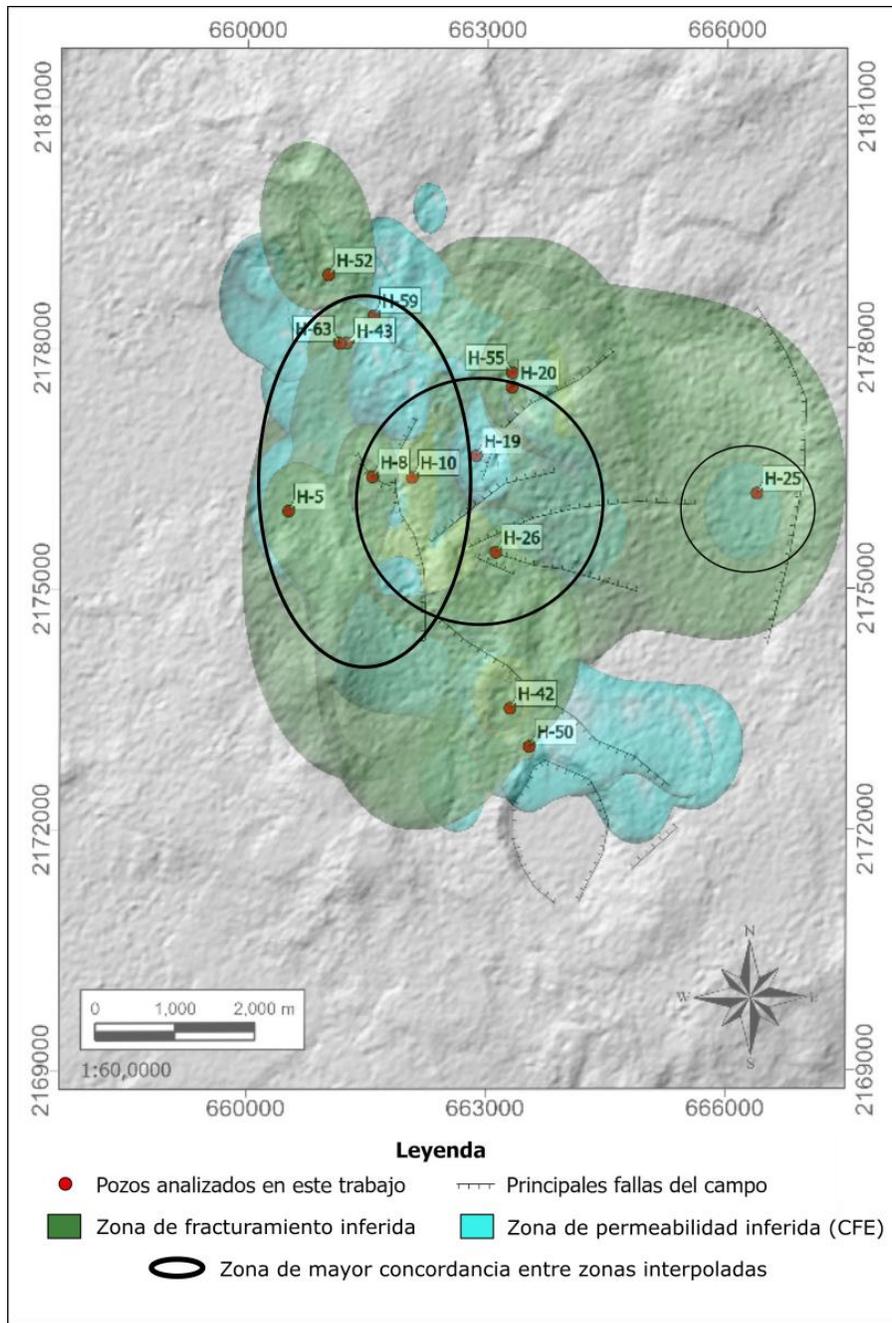


Figura 36. Vista en planta del modelo digital que muestra el área de concordancia entre las zonas de interpolación, que pueden interpretarse como posibles zonas de permeabilidad dominadas por fracturamiento.

6.4. Análisis de la distribución de los miembros de la unidad 7

De manera adicional al análisis de la densidad de fracturamiento y su correlación con condiciones favorables de permeabilidad para el yacimiento geotérmico de Los Humeros, se presenta de manera complementaria un análisis para determinar la distribución 3D de los nuevos miembros propuestos para la unidad 7, en donde se aloja el yacimiento geotérmico. Con la información reportada por Peña-Rodríguez (2021) fue posible realizar el modelo tridimensional en Leapfrog Geo, donde se muestra una nueva configuración respecto a los miembros pertenecientes a la unidad 7, los cuales fueron modelados como una sola unidad en el modelo previo de la estratigrafía de la caldera de Los Humeros. Se han analizado una variedad de cortes con diferentes direcciones dentro de la sección del campo y ha sido posible visualizar las posibles posiciones espaciales de los diferentes miembros que conforman la unidad 7.

Al integrar la estratigrafía del subsuelo propuesta por Peña-Rodríguez (2021) como base del modelo tridimensional, fue posible realizar algunos análisis adicionales a partir de los miembros andesíticos de la unidad 7, para identificar las posibles fuentes eruptivas de los flujos y la dirección preferencial que estos pudieron tomar. Gracias a los resultados de un análisis sobre la paleo-topografía que existía al momento de cada evento eruptivo, se identificaron las variaciones de los espesores de las lavas de cada nuevo miembro, siendo de importancia el emplazamiento de estos paquetes de roca de composición predominantemente intermedia. La realización del modelo 3D ha sido de gran ayuda para obtener una visualización más precisa de cómo es que podría haberse configurado el subsuelo del CGLH. Los miembros de la unidad 7 muestran el siguiente orden cronológico: 7.A.1, 7.A.2, 7.B.1, 7.B.2 y 7.B.3. Para el presente análisis se consideraron dos parámetros principales, la ubicación en altura del miembro y su espesor.

En los diagramas de la Figura 37 se presenta la cronología para el emplazamiento de cada uno de los miembros estratigráficos que ha sido objeto del presente análisis, mostrando como han rellenado las depresiones de la paleotopografía, acomodándose en los espacios disponibles.

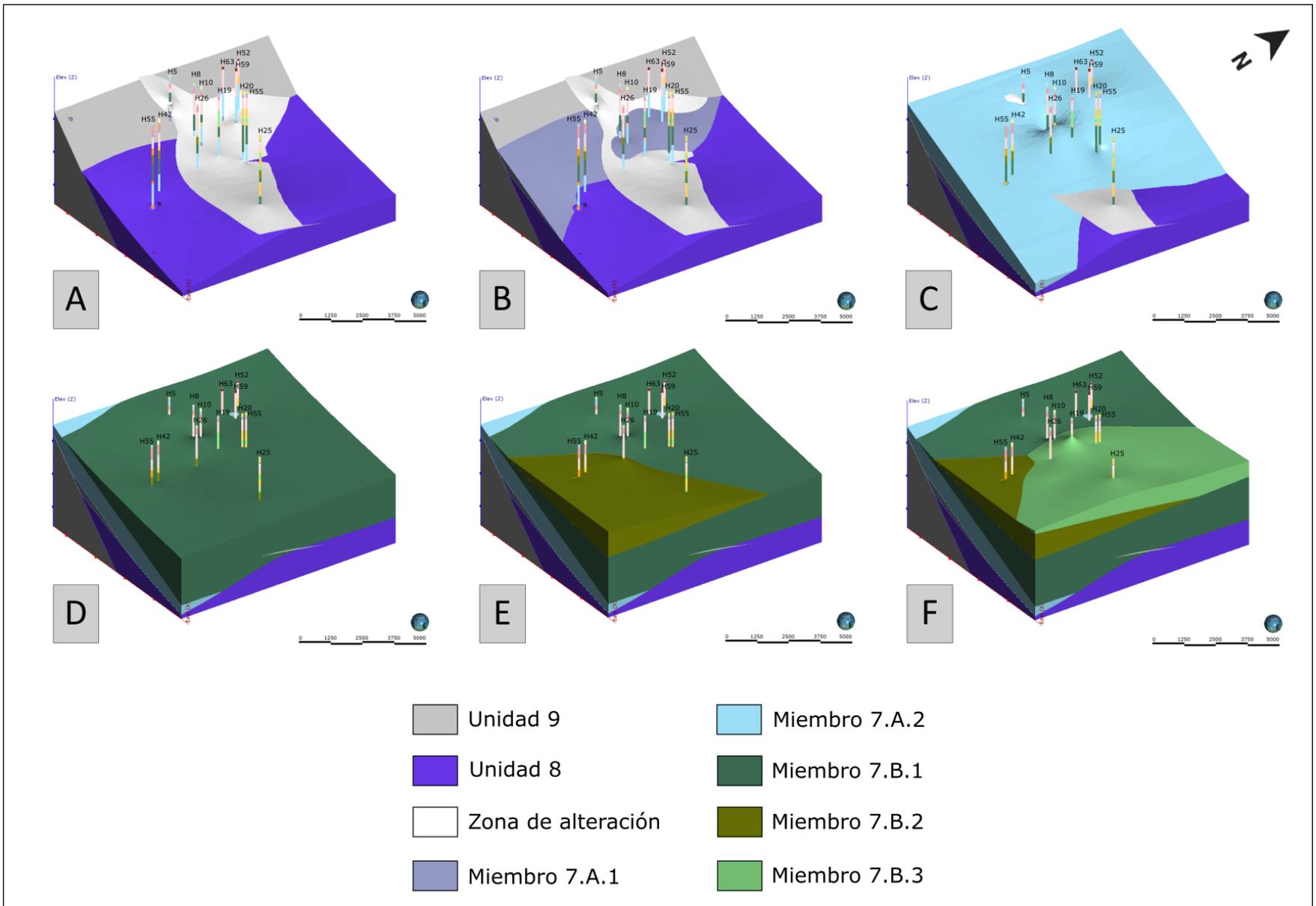
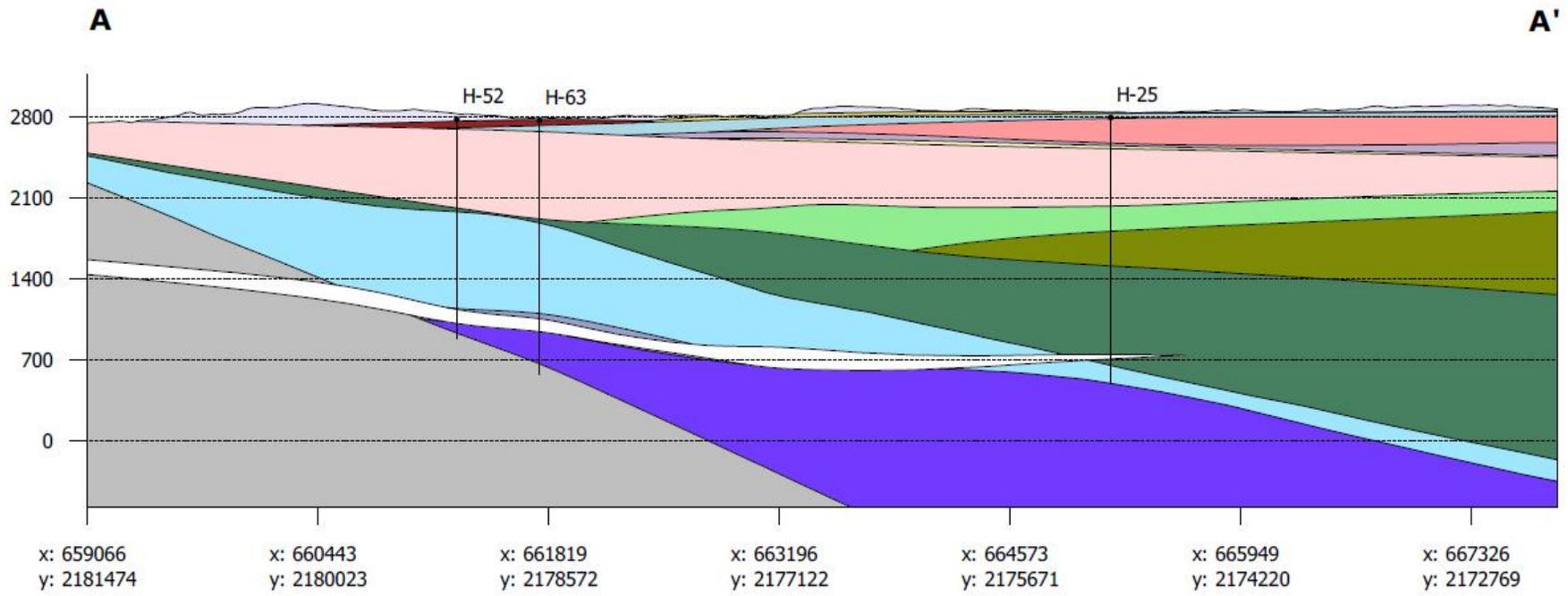


Figura 37. Diagramas de secciones en 3D que muestran la cronología de la distribución interpretada a partir de las unidades y miembros litoestratigráficos principales pertenecientes a la unidad 7 del grupo precladérico. Visualización modelada en Leapfrog Geo a partir de los registros de pozo. A) Unidad 9, unidad 8 y zona de alteración; B) Miembro 7.A.1; C) Miembro 7.A.2; D) Miembro 7.B.1; E) Miembro 7.B.2; F) Miembro 7.B.3.

Después de analizar los diferentes cortes, se logró elegir un perfil orientado en la dirección NW-SE que muestra de manera más clara las relaciones entre los diferentes miembros (Figura 38).

Por lo que respecta al miembro 7.A.1, éste no muestra información significativa que pueda indicar la ubicación precisa de la fuente, más allá de las muestras ubicadas a mayor elevación en el Pozo H5. El miembro 7.A.1 muestra una distribución restringida al sector occidental de la caldera, con una orientación norte-sur, siendo reconocida su presencia en los pozos H5, H8, H10, H59 y H63 (Figura 37B). La fuente de este miembro podría proponerse en los alrededores del pozo H5, hacia el sector occidental del campo geotérmico, con posibles direcciones de flujo norte-sur y limitada hacia el este siendo restringida por la presencia de la unidad 8.

El miembro 7.A.2 (Figura 38) tiene una distribución más amplia y se observa que el mayor espesor se encuentra próximo a los pozos H43, H52, H59 y H63 (Figura 37C), con espesores de hasta 800 m, los cuales tienden a disminuir hacia el sureste, lo que sugiere que la fuente podría ubicarse posiblemente en la sección noroeste del campo geotérmico o en zonas proximales. Asimismo, las direcciones de estas antiguas lavas pueden inferirse a partir de la reducción de los espesores según las muestras obtenidas y diferenciadas a partir de su composición geoquímica, lo que indicaría en este caso un desplazamiento en un abanico entre las direcciones NO-S (pozos H42 y H50) y NO-E (pozo H25).



Unidades-Miembros estratigráficos

1	3	7.B.2	4
2.A	5	7.B.3	
2.B	7.A.1	8	
2.D	7.A.2	9	
2.E	7.B.1	Z. A.	

Ubicación (UTM)

A: 659066, 2181474
 A': 667841, 2172227

Scale: 1:50,000
 Vertical exaggeration: 1x

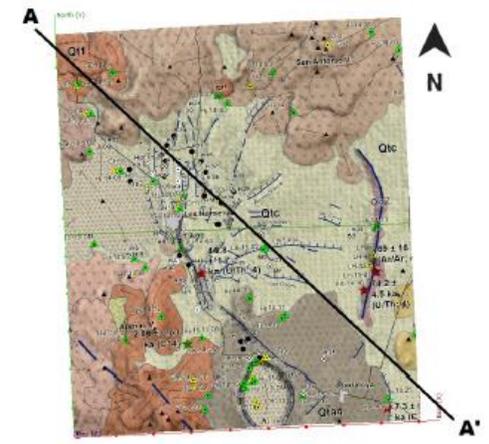


Figura 38. Corte en la sección A-A' en dirección NO-SE del modelado 3D del campo geotérmico, se resalta la distribución del miembro 7.A.2 y se observan los mayores espesores en la sección noroccidental del campo con reducción de su espesor en dirección sureste.

Para el miembro 7.B.1 se han reportado espesores mayores en las zonas circundantes a los pozos H20 y H55, lo que podría indicar que la fuente se localice muy cercana a este sitio (Peña-Rodríguez, 2021); sin embargo, no se descarta la posibilidad de que la fuente se encuentre en la sección occidental de la caldera (Figura 37D), ya que el miembro subyacente (miembro 7.A.2) se encuentra arriba en esta zona, lo que podría sugerir una posible fuente con emplazamientos preferenciales distribuidos hacia el noreste, este y sur de la caldera. Este miembro, al igual que el 7.A.2, tiene una amplia distribución en el campo.

Sobreyaciendo al miembro 7.B.1 se encuentra el miembro 7.B.2, el cual posee sus mayores espesores reportados en el sector sur (pozos H42 y H50) (Figura 37E), sugiriendo la fuente de los flujos hacia esta zona, aunque el modelo tridimensional podría indicar la fuente en el sureste de la caldera y, debido a la falta de información de pozos adicionales que indicaran la presencia de este miembro en las zonas centrales o distribuidas al noreste, se puede inferir el desplazamiento de los flujos hacia el norte de la caldera donde se presenta con menores espesores, en los pozos H25 y H26.

El miembro final del vulcanismo efusivo precaldérico, denominado como 7.B.3, presenta una distribución limitada en las inmediaciones del subsuelo del CGLH (Figura 37F). El espesor mayor se localiza en el pozo H19, lo que sugiere que la fuente se encontraría en los alrededores de este sitio, la distribución preferencial según las interpolaciones en el modelo se muestra como un abanico con direcciones norte, noreste, este y sureste de la caldera.

A partir de la visualización en el modelo 3D se han podido generar las interpretaciones acerca de la ubicación de las posibles fuentes eruptivas de los distintos miembros que integran la unidad 7. En la Figura 39 se muestran los puntos de las posibles fuentes eruptivas (algunos miembros muestran más de una posible fuente). Debido a que el área de estudio se enfoca en los límites del campo CGLH, es difícil ubicar sitios puntuales dentro del volumen espacial que ocupa el modelo. Además de la incertidumbre determinada por la distancia entre sí de los datos interpolados para la generación de las capas que conforman a los volúmenes estratigráficos. Sin embargo, el modelo se ha considerado como una aproximación útil en la determinación de las posibles fuentes y direcciones de estos flujos efusivos de lava de composición intermedia que fueron expulsados en periodos previos a la formación de la caldera de Los Humeros.

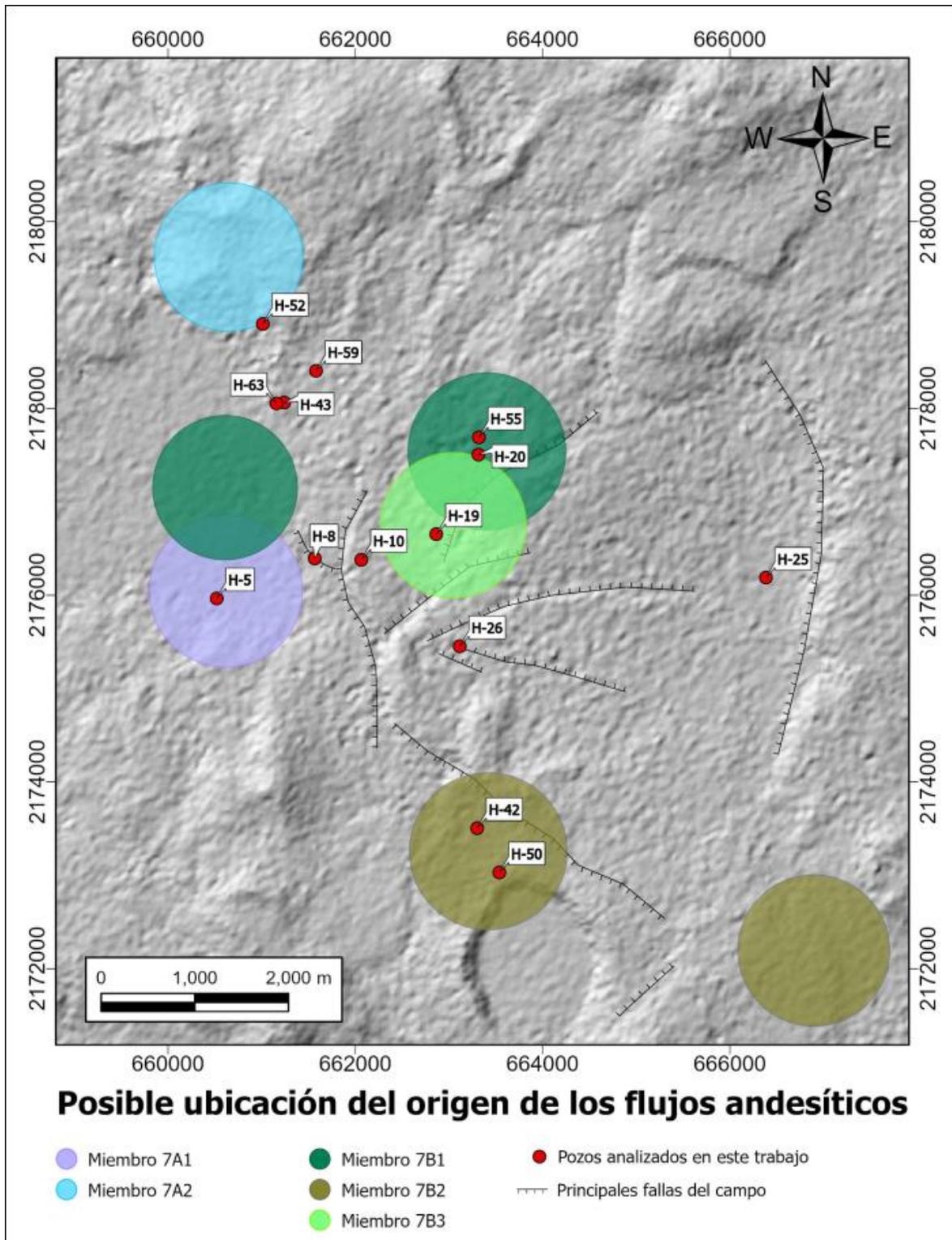


Figura 39. Posible ubicación de las fuentes eruptivos de los flujos andesíticos de la unidad 7 a partir de la interpretación del modelo tridimensional. Los miembros 7.B.1 y 7.B.2 muestran dos posibles fuentes ya que es difícil determinar sólo una a partir de los datos analizados.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Con la caracterización del fracturamiento llevada a cabo en este trabajo ha sido posible asignar los valores normalizados de densidades de fracturamiento a un índice semi-cuantitativo con el cual se generó una aproximación de las secuencias fracturadas dentro del subsuelo del Campo Geotérmico Los Humeros. Con esta información y datos previos, se desarrolló un modelo tridimensional que muestra, una zona de posible permeabilidad asociada al fracturamiento, incluso en zonas distales a los pozos de los que se han obtenido las muestras. La metodología aplicada demostró, en términos generales, una concordancia satisfactoria entre los datos de densidad de fracturamiento y las zonas de permeabilidad reportadas del reservorio, validando así el método. Es importante mencionar que no fue posible obtener el mismo resultado para todos los pozos, debido a dificultades con el tipo y la calidad de las muestras empleadas. Asimismo, una limitante importante del análisis realizado es la escalabilidad ya que, al tratarse de escalas milimétricas, el estudio y la medición de parámetros relacionados con las fracturas se vuelve complicado a escalas cada vez más pequeñas. De igual manera, se requieren estudios estructurales en detalle para determinar la representatividad de los resultados obtenidos a mayores escalas.

El modelo tridimensional actualizado permite la visualización amplia de la nueva configuración geológica, ya que muestra la estratigrafía actualizada hasta el momento y sirve como la base para indicar posibles zonas de fracturamiento en el subsuelo, dentro del reservorio geotérmico. La integración de la información generada con anterioridad ha sido de suma importancia para realizar la conformación del modelo del fracturamiento.

Uno de los resultados importantes de esta investigación ha sido el comprobar que las densidades de fracturamiento unidimensionales pueden ser útiles como un indicador para cuantificar el fracturamiento en muestras de este tipo. Lo que podría servir en futuros trabajos donde no existiera más información para este propósito, ya sea por falta de muestras efectivas o por limitaciones metodológicas. El fracturamiento en el subsuelo, en sus diferentes escalas, presenta una complejidad amplia y requiere de una extensa caracterización para la

identificación de los parámetros adecuados que permitan cuantificación de la forma más precisa posible.

El desarrollo de la metodología permitió además analizar patrones de correlación e interpretación adicionales, como fue la relación entre densidad de fracturamiento con las facies de soldamiento de la ignimbrita Xáltipan, lo que indica cierta concordancia entre ambos parámetros.

Por otro lado, se realizó también el análisis de los flujos de la unidad 7 del vulcanismo precaldérico con ayuda del modelo 3D, lo que comprueba la utilidad que la visualización tridimensional ofrece. Se ha propuesto la ubicación de posibles zonas donde podrían ubicarse las fuentes eruptivas de los miembros estratigráficos pertenecientes a la unidad 7, además de la posible dirección que estos pudieron tomar. Este análisis comprende la interpolación de los datos del modelo desarrollado en *Leapfrog Geo*.

La sección modelada de la estratigrafía de la caldera volcánica de Los Humeros sirve como un importante complemento al modelo geotérmico-magmático conceptual de la caldera y que puede integrar además la información térmica del reservorio, siendo un modelo fácilmente actualizable en la medida que se sume nueva información, incluyendo muestras de pozos o datos estructurales adicionales.

Finalmente, se resalta el desarrollo de los métodos aplicados en este estudio para la visualización en formato 3D que facilita las comparaciones e interpretaciones de parámetros que determinan la permeabilidad, como el fracturamiento del subsuelo. Añadiendo diversas técnicas desarrolladas por otros autores y con la caracterización de muestras de pozo adicionales del CGLH, es posible disminuir el grado de incertidumbre y señalar así zonas de mayor permeabilidad. De esta manera, es posible proponer áreas de perforación donde se pueda obtener el máximo aprovechamiento del recurso geotérmico.

REFERENCIAS

- Acosta Azúa, R. I. (2016). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica De Una Sección Del Subsuelo Del Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla: Caso De Estudio Del Pozo H-20*. Instituto Tecnológico De Ciudad Madero.
- Aguilar-López, J. C. (2009). Análisis y Uso de Funciones de Base Radial como Filtros Interpoladores. INAOE.
- Alcaraz S, Lane R, Spragg K, Milicich S, Sepulveda F, Bignall, G. (2011). *3D geological modelling using new Leapfrog Geothermal software*. In Proceedings of 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, USA.
- Arellano, V. M., García, A., Barragán, R. M., Izquierdo, G., Aragón, A., Nieva, D., (2003). *An updated conceptual model of the Los Humeros geothermal reservoir (Mexico)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 124 (1), p. 67–88.
- Arellano, V.M., A. García, R.M. Barragán, G. Izquierdo, A. Aragón y A. Pizano, (1999). *Modelo conceptual del estado inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., México*. Geotermia, Vol. 15, No. 2, pp. 111-120.
- Arellano, V.M., García-Gutiérrez, A., Barragán, R.M., Izquierdo, G., Aragón, A., Pizano, A., (2000). *A Conceptual Model of the Los Humeros, (México), Geothermal Reservoir in Its Natural State*. World Geotherm. Congr. 2000 15, p. 2503–2509.
- Arellano-Méndez, L. U., Bello-Pineda, J., Aké-Castillo, J. A., Pérez-España, H., & Martínez-Cardenas, L. (2016). *Distribución espacial y estructura morfométrica de las praderas de Thalassia testudinum (Hydrocharitaceae) en dos arrecifes del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México*. Revista de Biología Tropical, 64(2), 427-448.
- Armstead, H.C.H. (1983) *Geothermal Energy: Its Past, Present and Future Contributions to the Energy Needs of Man*. Spon Press; 2nd edition, 448 p.
- Arnórsson, S., Gunnlaugsson, E., and Svavarsson, H. (1983). *The chemistry of geothermal waters in Iceland*. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochimica et Cosmochimica Acta, 47(3):567–577.
- Barbier E., (2002). *Geothermal energy technology and current status: an overview*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 6, 3-65.
- Burgos, E. and Arellano Gómez, V. (1998). *Perspectivas de la investigación de recursos energéticos del subsuelo en el IIE*. Boletín IIE.
- Calcagno, P., Evanno, G., Trumpy, E., Gutiérrez-Negrín, L. C., Macías, J. L., Carrasco-Núñez, G., and Liotta, D.: *Preliminary 3-D geological models of Los Humeros and Aocolulco geothermal fields (Mexico) – H2020 GEMex Project*, Adv. Geosci., 45, 321- 333, <https://doi.org/10.5194/adgeo-45-321-2018>, 2018.

Carrasco Núñez, G., Arzate Flores, J., Berna Uruchurtu, J.P., Carrera Hernández, J.J., Cedillo Rodríguez, F., Dávila Harris, P., Hernández Rojas, J., Hurwitz, S., Lermo Samaniego, J.F., Levresse Gilles, P.R., López Quiroz, P., Manea, V.C., Norini, G., Santoyo Gutiérrez, E.R., Willcox, C., (2015). *A new geothermal exploration program at Los Humeros volcanic and geothermal field (Eastern Mexican Volcanic Belt)*, in: Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia, p. 10.

Carrasco-Núñez, G. y Branney, M. J. (2005). *Progressive assembly of a massive layer of ignimbrite with normal-to-reverse compositional zoning: The Zaragoza ignimbrite of central Mexico*. Bulletin of Volcanology, 68, p. 3-20. <http://DOI 10.1007/s00445-005-0416-8>

Carrasco-Núñez, G., & Hernández-Rojas, J. (2016). *Estudio petrográfico del Pozo H-55, Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla* (p. 94). CEMIEGEO.

Carrasco-Núñez, G., Bernal, J. P., Dávila, P., Jicha, B., Giordano, G., & Hernández, J. (2018). *Reappraisal of Los Humeros Volcanic Complex by New U/Th Zircon and 40 Ar/39 Ar Dating: Implications for Greater Geothermal Potential*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 19(1), 132-149. <https://doi.org/10.1002/2017GC007044>

Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A. y Lozano, V. L. (1997). *Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico*. The Geological Society of America Bulletin, Map Chart Series, MCH, 081, 10 pp.

Carrasco-Núñez, G., Gómez-Tuena, A., López, M., Vargas, V., Aranda-Gómez, J.J., Cedillo, F. y Origel, G., (2008). *Estudio de estratigrafía volcánica de la secuencia andesítica del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla*: Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad. Informe Interno DEX-HT-19-08.

Carrasco-Núñez, G., Hernández, J., De León, L., Dávila, P., Norini, G., Bernal, J. P., Jicha, B., Navarro, M., & López-Quiroz, P. (2017). *Geologic Map of Los Humeros volcanic complex and geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt*. Terra Digitalis, 1(2). <https://doi.org/10.22201/igg.terradigitalis.2017.2.24>

Carrasco-Núñez, G., López-Martínez, M., Hernández J. y Vargas, V. (2017a). *Surface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt*. Geothermics, 67, p. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2017.01.001>

Carrasco-Núñez, G., McCurry, M., Branney, M. J., Norry, M. y Willcox, C. (2012). *Complex magma mixing, mingling, and withdrawal associated with an intra-Plinian ignimbrite eruption at a large silicic caldera volcano: Los Humeros of central Mexico*. The Geological Society of America Bulletin, 124, p. 1793-1809. <https://doi.org/10.1130/B30501.1>

Caruso, N. D., (2009). *Utilización de RBFS para la interpolación de datos batimétricos*. Mecánica computacional Vol. XXVIII, pp. 2373-2383.

Cavazos-Álvarez, J. A., & Carrasco-Núñez, G. (2019). *Effective mapping of large ignimbrites by using a GIS-based methodology; case of the Xáltipan ignimbrite from Los Humeros caldera, Mexico*. Terra Digitalis, 3(2).

Cavazos-Álvarez, J. A., Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Peña, D., Jáquez, A., & Arteaga, D. (2020). *Facies variations and permeability of ignimbrites in active geothermal systems; case study of the Xáltipan ignimbrite at Los Humeros Volcanic Complex*. Journal of South American Earth Sciences, 104, 102810. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102810>

Cedillo, F., (2000). *Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros*. In: Proceedings World Geothermal Congress 2000. Puebla, México Kyushu – Tohoku Japan. pp. 1639–1644.

CEMIEGEO (2019). *Usos directos del calor geotérmico*. <https://cemiego.org/index.php/proyectos/ usos-directos-del-calor-geotermico>

Cid, H. E., Carrasco-Núñez, G., Manea, V. C., Vega, S., & Castaño, V. (2021). *The role of microporosity on the permeability of volcanic-hosted geothermal reservoirs: A case study from Los Humeros, Mexico*. Geothermics, 90, 102020. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102020>

Cruz, A. (2016). *¿Cuáles son las cuatro zonas con mayor potencial geotérmico en México?* ProyectoFSE. <https://www.proyectoFSE.mx/2016/10/10/potencial-geotermico-en-mexico/>

Dávila-Harris, P. y Carrasco-Núñez, G. (2014). *An unusual syn-eruptive bimodal eruption: The Holocene Cuicuiltic Member at Los Humeros caldera, Mexico*. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 271, 24-42 p. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.11.020>

De Baccelle, L. Bosollini, A. (1965). *Diagrammi per la stima visive della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie*. Annali dell'Università di Ferrara, Scienze geologiche e paleontologiche, 1(3), 59-62.

Del Pilar Martínez, A. (2015). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica De Una Sección Del Subsuelo En El Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla: El Caso Del Pozo H-42*. Universidad Autónoma De Guerrero.

Demant, A., (1978). *Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 2, p. 172-187.

Dickson, M. H. and Fanelli, M. (2004). *What is geothermal energy?* Environmental Science.

Dickson, M.H., Fanelli, M. (2005) *Geothermal Energy: Utilization and Technology*. Earthscan Publications Ltd., 226 p.

Dolezal, A., & Majano, A. M. (2013). *The Way Forward for Renewable Energy in Central America*. Washington, D. C.: Worldwatch Institute.

Fernández Maya, F. O. (2017). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica Del Pozo H-26 En El Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla*. Instituto Tecnológico De Ciudad Madero. Tesis de Licenciatura.

Fernández Maya, F. O. (2021). *Modelo Tridimensional De La Caldera De Los Humeros; Implicaciones Geológicas Y Geotérmicas*. Universidad Nacional Autónoma De México. Tesis de Maestría.

Ferrari, L., Conticelli, S., Vaggelli, G., Petrone, C. M. y Manetti, P. (2000). *Late Miocene volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt*. *Tectonophysics*, 318, p. 161-185. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00310-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00310-8)

Ferrari, L., López-Martínez, M., Aguirre-Díaz, G. y Carrasco-Núñez, G., (1999). *Spacetime patterns of Cenozoic arc volcanism in Central Mexico; from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt*: *Geology*, v. 27-4, p. 303-306.

Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M., (2012). *The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone*. *Tectonophysics* 522–523, 122–149.

Ferriz, H., & Mahood, G. A. (1987). *Strong compositional zonation in a silicic magmatic system: Los Humeros, Mexican Neovolcanic Belt*. *Journal of Petrology*, 28(1), 171-209

Ferriz, H., (1985). *Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de los humeros, Puebla, México*: *Geofísica Internacional*, 24(1), 97-157.

Ferriz, H.Y., Mahood, G., (1984). *Eruption rates and compositional trends at los humeros volcanic center, Puebla, Mexico*. *J. Geophys. Res.* 89 (B10), 8511–8524.

Franke, R. (1982). *Scattered data interpolation: Tests of some methods*. *Math. Comp.*, 38(157):292-300.

García-Gutiérrez, Alfonso. (2009). *Estado térmico inicial del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México*. *Geotermia*, v. 22, p. 59-70.

Glowacka, E., Sarychikhina, O., & Nava, F. A. (2005). *Subsidence and Stress Change in the Cerro Prieto Geothermal Field, B. C., Mexico*. *Pure and Applied Geophysics*, 162(11), 2095-2110. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2706-7>

Gómez-Castellanos, E. (2016). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica De Una Sección Del Subsuelo Del Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla: Caso De Estudio Del Pozo H-5*. Instituto Tecnológico De Ciudad Madero.

Gómez-Tuena, A., & Carrasco-Núñez, G. (2000). *Cerro Grande volcano: the evolution of a Miocene stratocone in the early Trans-Mexican Volcanic Belt*. *Tectonophysics*, 318(1-4), 249-280.

Gutiérrez-Negrín, E., Izquierdo-Montalvo, G., (2010). *Review and update of the main features of the Los Humeros geothermal field*. In: Proceedings World Geothermal Congress. Mexico, Bali, Indonesia. April 2010.

Gutiérrez-Negrín, L. C. A. (2019). *Current status of geothermal-electric production in Mexico*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 249, 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012017>

Guzmán, J. S. (2011). *Evaluación del potencial de energía geotérmica*. Madrid: IDAE.

Hardy, R.L. (1971). *Multiquadric equations of topography and other irregular surfaces*. Journal of Geophysical Research, 176, 1905-1915.

Huerta Luna, G. (2018). *Caracterización Geológica Y Geoquímica De Subsuelo Del Campo Geotérmico Los Humeros, Puebla, México: Caso De Estudio, Pozo H-50*. Instituto Politécnico Nacional.

IEA (2020), *Renewables Data Explorer*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer/2020>

IEA (2022). *Renewables Data Explorer*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/renewables-data-explorer/2022>

IEA. (2021). *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*. International Energy Agency, 224. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IRENA (2015). *Renewable Energy Prospects: Mexico, REmap 2030 analysis*. IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org/remap

IRENA. (2022). *Renewable Energy Statistics 2022*. The International Renewable Energy Agency.

Jáquez Domínguez, J. A. (2018). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica Del Pozo H-59 Del Campo Geotérmico “Los Humeros”, Puebla*. Universidad Autónoma De Zacatecas.

Jentsch, A. (2021). *Soil gas analytics in geothermal exploration and monitoring* (p. 45175 KB, xxxi, 162 pages) [Universität Potsdam; Application/pdf]. <https://doi.org/10.25932/PUBLISHUP-54403>

Kagel, A., Gawell, K. (2005). *Promoting geothermal energy: Air emissions comparison and externality analysis*. The Electricity Journal, Vol. 18, 90-99.

Limberger, J., Boxem, T., Pluymaekers, M., Bruhn, D., Manzella, A., Calcagno, P., Beekman, F., Cloetingh, S., and van Wees, J.-D. D. (2018). *Geothermal energy in deep aquifers: A global assessment of the resource base for direct heat utilization*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82(November 2016):961–975.

Llambías, E. J. (2001). *Geología de los cuerpos ígneos*.

Llopis, G., y Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*. Fundación de la Energía. Madrid, España.

López-Hernández, A. (1995). *Estudio geológico-estructural de las rocas del yacimiento del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla*. Informe interno OGL-HU-014/95

Lucci, F., Carrasco-Núñez, G., Rossetti, F., Theye, T., Charles White, J., Urbani, S., Azizi, H., Asahara, Y., & Giordano, G. (2020). *Anatomy of the magmatic plumbing system of Los Humeros Caldera (Mexico): Implications for geothermal systems*. *Solid Earth*, 11(1), 125–159. <https://doi.org/10.5194/se-11-125-2020>

Machorro Bretón, J. O. (2018). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica De Una Sección Del Subsuelo Del Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla: Caso De Estudio Del Pozo H-63*. Instituto Politécnico Nacional.

Mooser, F., (1972). *The Mexican Volcanic Belt, structure and Tectonics*: *Geof.Int.* 12(2), 55-70, México.

Narr, W. y Schechter D. S. (2006). *Naturally Fractured Reservoir Characterization*. Richardson, Texas: Society of Petroleum Engineers.

Nieto-Samaniego, Á. F., Alaniz-Álvarez, S. A., Tolson, G., Xu, S., & Pérez-Venzor, J. A. (2003). *Estimación de densidades, distribuciones de longitud y longitud total de fracturas; un caso de estudio en la Falla de Los Planes, La Paz, B.C.S.* *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 56(1), 1-9. <https://doi.org/10.18268/BSGM2003v56n1a1>

Norini, G., Carrasco-Núñez, G., Corbo-Camargo, F., Lermo, J., Rojas, J. H., Castro, C., Bonini, M., Montanari, D., Corti, G., Moratti, G., Piccardi, L., Chavez, G., Zuluaga, M. C., Ramirez, M., & Cedillo, F. (2019). *The structural architecture of the Los Humeros volcanic complex and geothermal field*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 381, 312-329. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.06.010>

Norini, G., Gropelli, G., Sulpizio, R., Carrasco-Núñez, G., Dávila-Harris, P., Pelliccioli, C., Zucca, F., & De Franco, R. (2015). *Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 221-237. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.05.014>

Oliver, M. A. (1990). *"Kriging: A Method of Interpolation for Geographical Information Systems"*. *International Journal of Geographic Information Systems* 4: 313–332.

Pardo, M., Suarez, G., (1993), *Steep subduction geometry of the Rivera Plate beneath the Jalisco Block in western of México*: *Geophysical Research Letter*, 20, 2391-2394.

Pardo, M., Suarez, G., (1995), *Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern México; seismic and tectonic implication*: *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12373.

- Peña Rodríguez, D. (2021). *Re-Evaluación Litoestratigráfica Del Subsuelo Del Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla, México*. Universidad Nacional Autónoma De México. Tesis de Maestría.
- Peña-Rodríguez, D. (2018). *Caracterización Petrográfica Y Geoquímica De Una Sección Del Subsuelo Del Campo Geotérmico De Los Humeros, Puebla: Caso De Estudio Pozo H-10*. Instituto Tecnológico De Ciudad Madero. Tesis de Licenciatura.
- Prol-Ledesma, R. M. (2001). *El Calor de la Tierra*. Fondo de Cultura Económica, México, primera ed edition.
- Prol-Ledesma, R.M., (1998). *Pre- and post-explotation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geotermal field, Mexico*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 83, 313–333.
- Quezadas-Flores, A., (1961). *Las rocas del basamento de la cuenca Tampico-Mizantla: México, D.F.*, bachelor thesis. Fac. Ing., UNAM 72 p.
- Rojas Ortega, E. (2016). *Litoestratigrafía, petrografía, y geoquímica de la Toba Llano, y su relación con el cráter El Xalapazco, Caldera de Los Humeros, Puebla* (Tesis de maestría).
- Rojo García, J. R. (2013). *Análisis de interpolación con funciones de base radial en el cráter de Chicxulub*. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis de Licenciatura.
- Romero-Miranda, E. L. (2011). *Importancia De Las Fracturas En Diferentes Aplicaciones De La Geología*. Universidad Nacional Autónoma De México.
- Rueda, J., Madero, H., Calderón, Z., Saavedra, N., Ojeda, G., Ortiz, A., & Piedrahita, C. (2010). *Metodología Para Determinar Densidad De Microfracturas En Rocas, A Partir De Parámetros Anisótropos. Una Aproximación En Núcleos Sintéticos*. Boletín de Geología. 32(1).
- Santoyo Gutiérrez, E. and Torres Alvarado, I. (2010). *Escenario Futuro De Explotación De La Energía Geotérmica: Hacia Un Desarrollo Sustentable*. Digital Universitaria, 11:26.
- SENER (2022). *Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional*. Technical report, Secretaría de Energía, Mexico City.
- SGC. (2019). *¿Qué es exploración geotérmica?* SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO.
- Shih, K. G. (1971). *Temperature production in the continental crust due to radioactive heat sources*. Pure and Applied Geophysics PAGEOPH, 90(1):115–125.
- Tarback, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física* (8va ed.). Pearson Educación.
- Van Golf-Racht, T. D. (1982). *Fundamentals of fractured reservoir engineering*. Amsterdam, Holanda/Elsevier Scientific Publishing Company.

- Verma, S.P., (1983). *Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, México—Nd and Sr isotope data*: Nature, v. 301, p. 52–55.
- Verma, S.P., (1984). *Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico*: Journal of Volcanology and Geothermal Research, v. 20, p. 21-40.
- Verma, S.P., (1985). *On the magma chamber characteristics as inferred from Surface geology and geochemistry: examples from Mexican geothermal áreas*: Physics of the Earth and Planetary Interiors, v. 41, p. 207–214.
- Viggiano, J. C. y Robles, J. (1988). *Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue.: sus usos como indicador de temperatura y del régimen hidrológico*: Revista Mexicana de Geoenergía, 4, p. 15-28.
- Viniegra-Osorio, F. (1965). *Geología del Macizo de Teziutlan y la Cuenca Cenozoica de Veracruz*: Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 17.
- Willcox, C.P., (2011). *Eruptive Magmatic and Structural Evolution of a large Explosive Caldera Volcano: Los Humeros, Central Mexico*: PhD Thesis, Universidad de Leicester, UK, p. 1-321.
- Wright, G. B., (2003). *Radial basis function interpolation: Numerical and Analytical Developments*. University of Colorado, Thesis.
- Yáñez, C. y García, S., (1982). *Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz*: Comisión Federal de Electricidad (CFE) México, v. 29, p. 1-98

ANEXO I

Gráficas de la variación vertical de fracturamiento de los pozos H43, H50, H52 y H59.

POZO H43

Los resultados provenientes del análisis del fracturamiento en el pozo H43 indican una semejanza con datos encontrados en el pozo H42. A pesar de su distal posición en el campo, estos pozos muestran probables niveles de permeabilidad gracias a un leve fracturamiento en la unidad 5 perteneciente a una zona de ignimbritas resultado del evento eruptivo que originó la formación de la caldera de Los Humeros. En este pozo sólo se identificó un leve fracturamiento en los estratos iniciales del reservorio compuesto por la unidad 7.

POZO H50

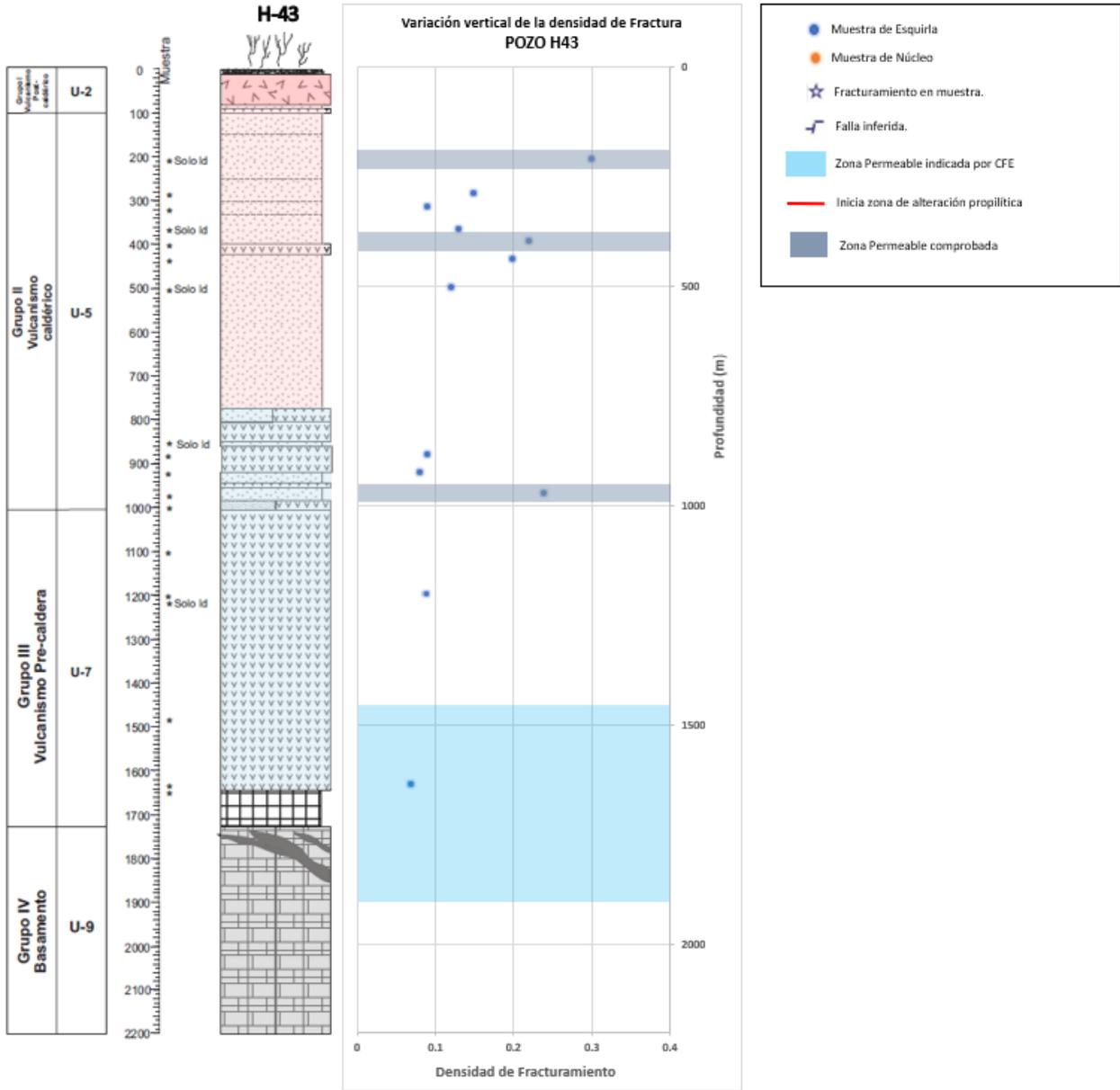
La zona permeable reportada por CFE está indicada en tres intervalos (1450-1650m, 1900-1950m y 2350-2400m). Las zonas de densidad de fractura rondan los valores entre 0.1 y 0.25 siendo este un bajo fracturamiento identificado en los primeros 1000 metros de profundidad, comprobando las permeabilidades bajas debidas posiblemente a los grados de soldamiento presentes en la roca sello del reservorio (apartado 6.3).

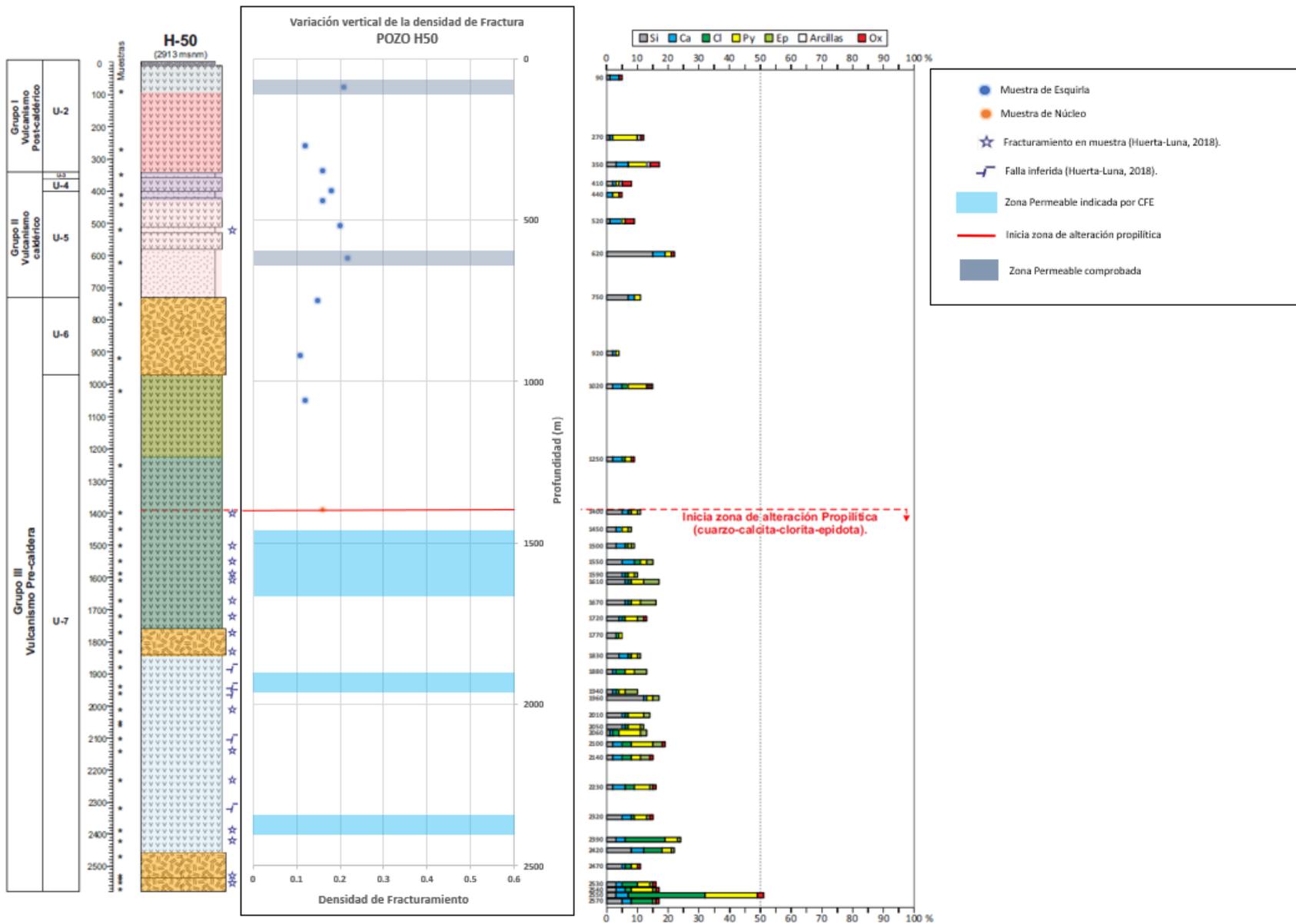
POZO H52

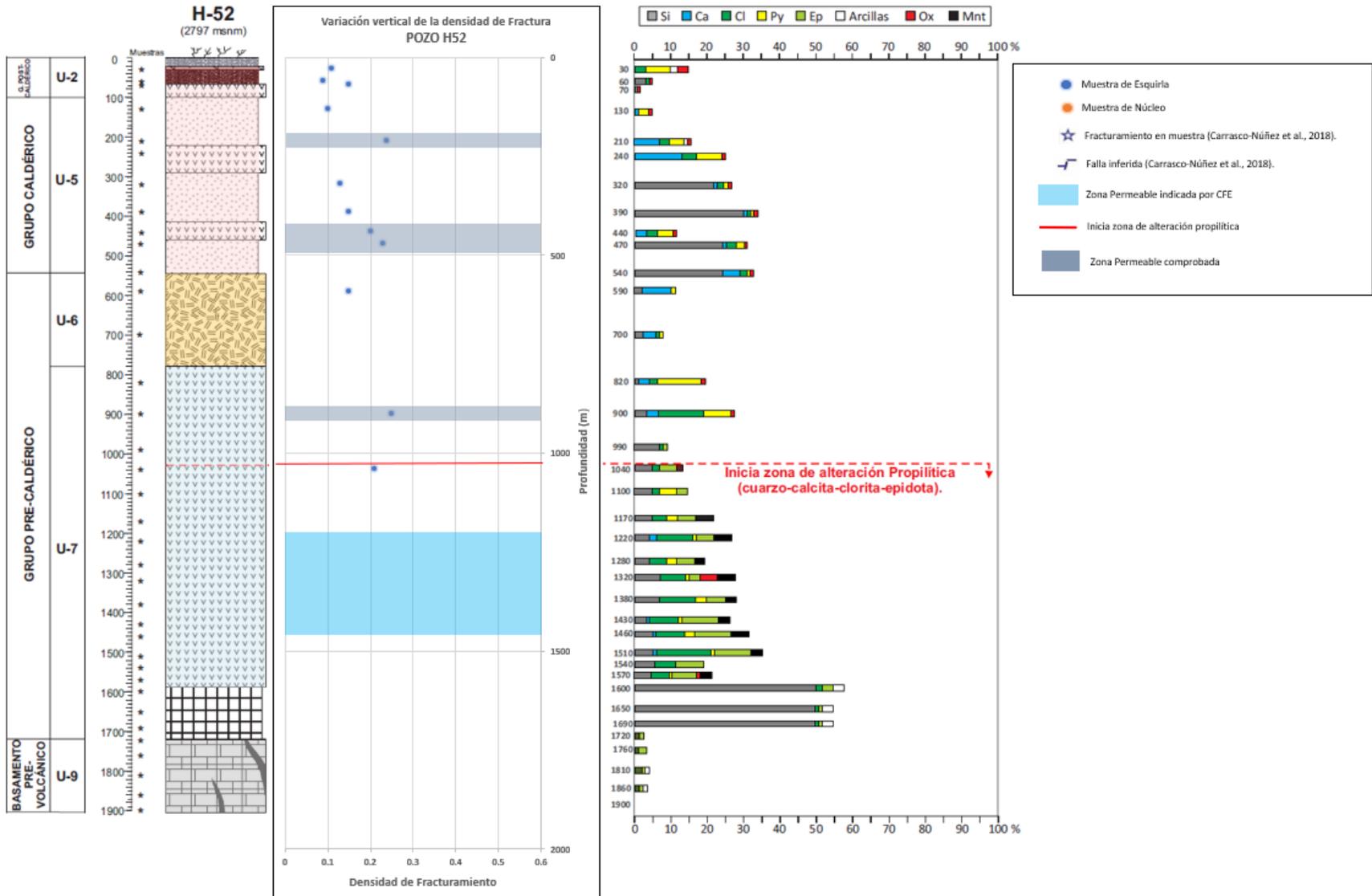
El pozo H52 muestra de igual forma un bajo volumen de muestras analizadas. Se identifica un fracturamiento bajo en los primeros 500 metros de profundidad en los horizontes del grupo caldérico y dos muestras pertenecientes al paquete andesítico de la unidad 7 con valores de densidad de fractura bajo-intermedio. No existen análisis significativos dentro del reservorio que pueda ampliar la zona de fracturamiento en el subsuelo debido al tamaño de las esquirlas siendo estas menores a 1 milímetro de diámetro consideradas como polvo proveniente de los núcleos.

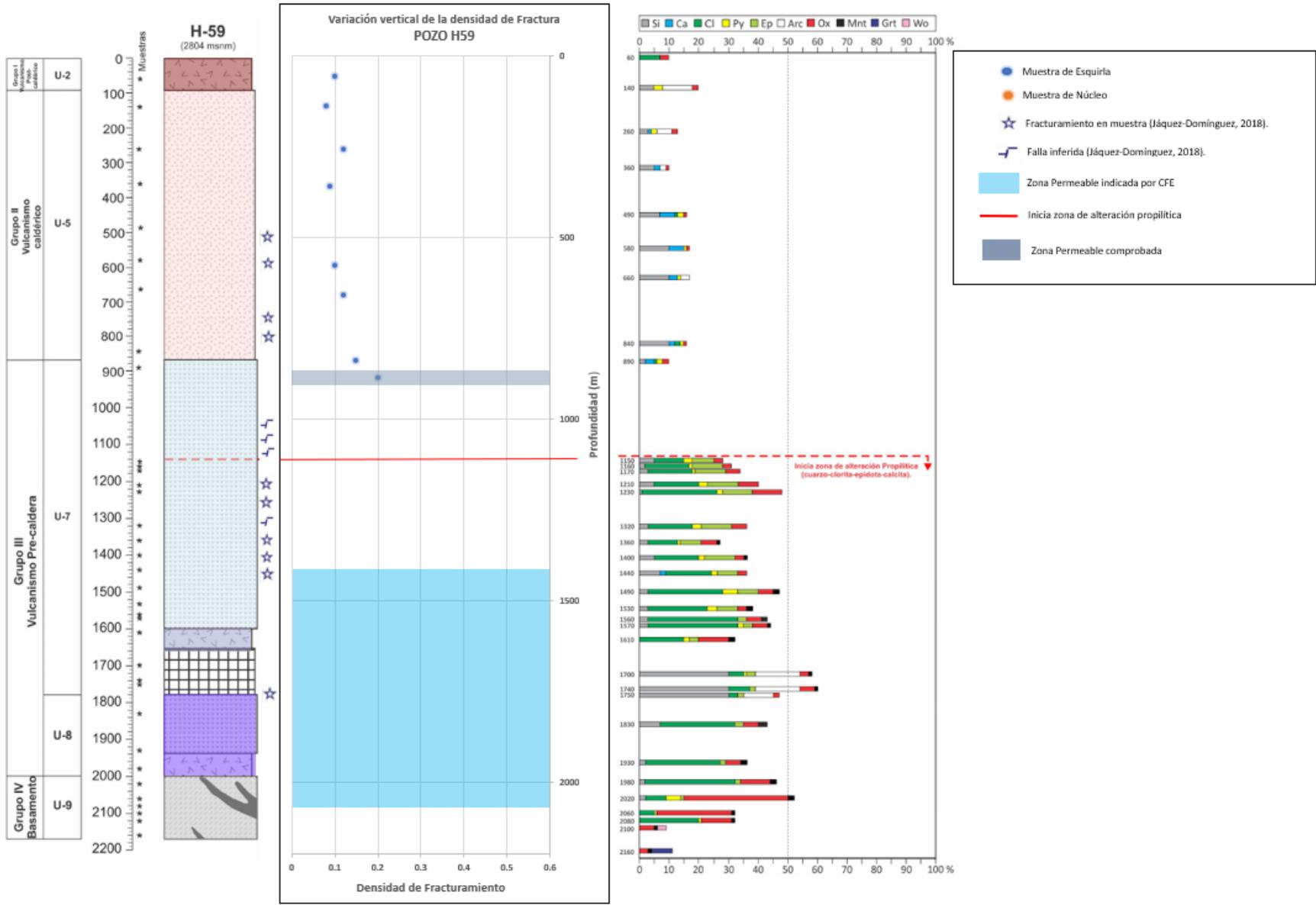
POZO H59

El análisis para el pozo H59 indica densidades de fractura generalmente bajas y sin muestras de importancia para el paquete andesítico de la unidad 7.

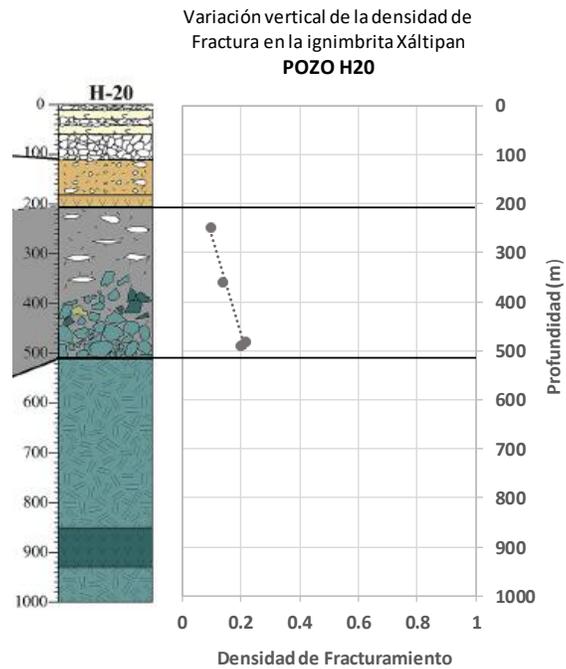
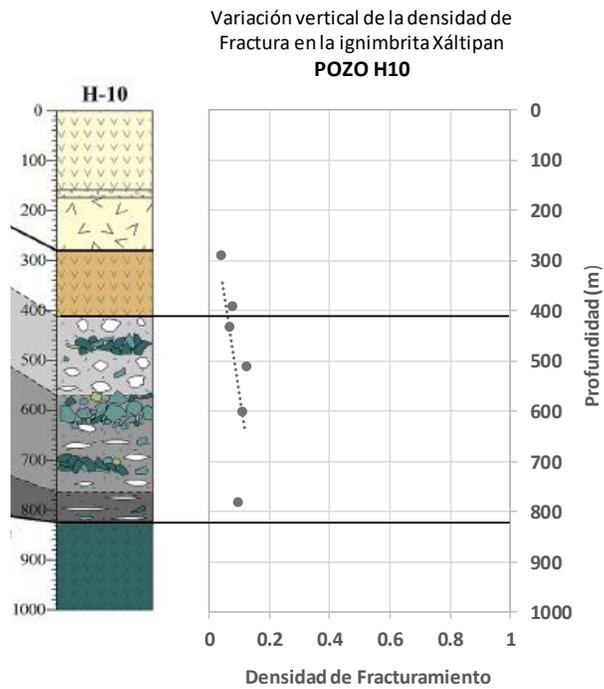




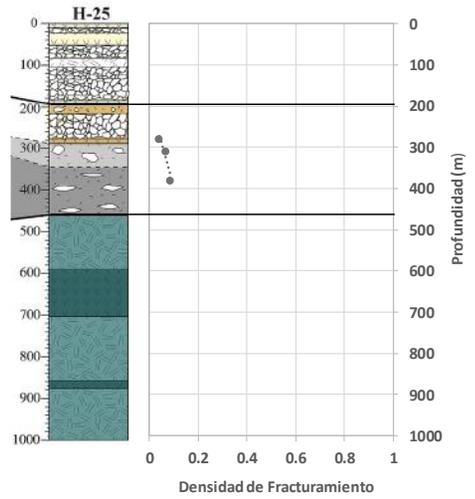




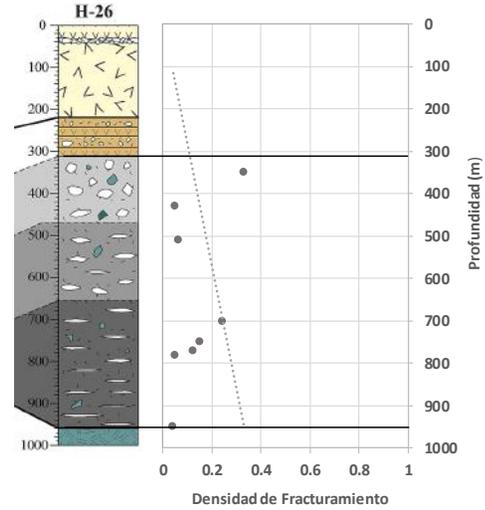
Gráficas de variación vertical en la sección de la ignimbrita Xáltipan y su relación con las fases de soldamiento.



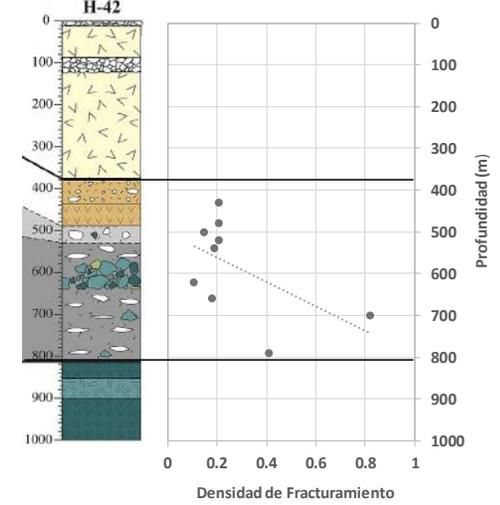
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H25



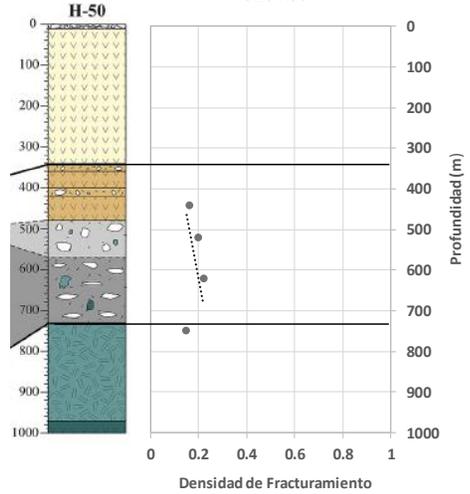
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H26



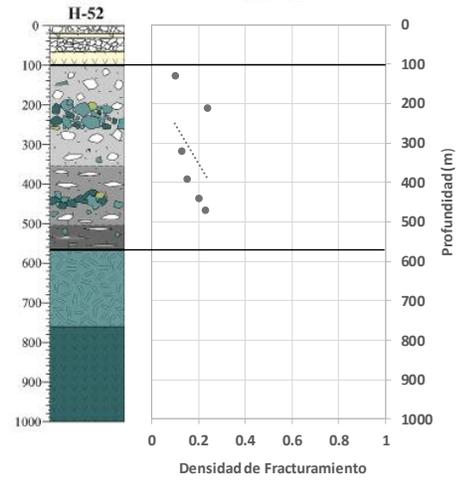
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H42



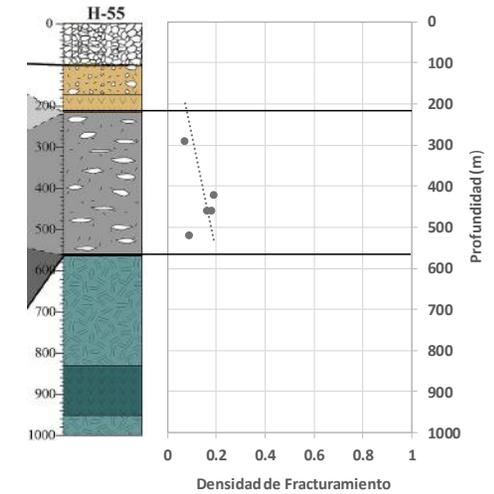
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H50



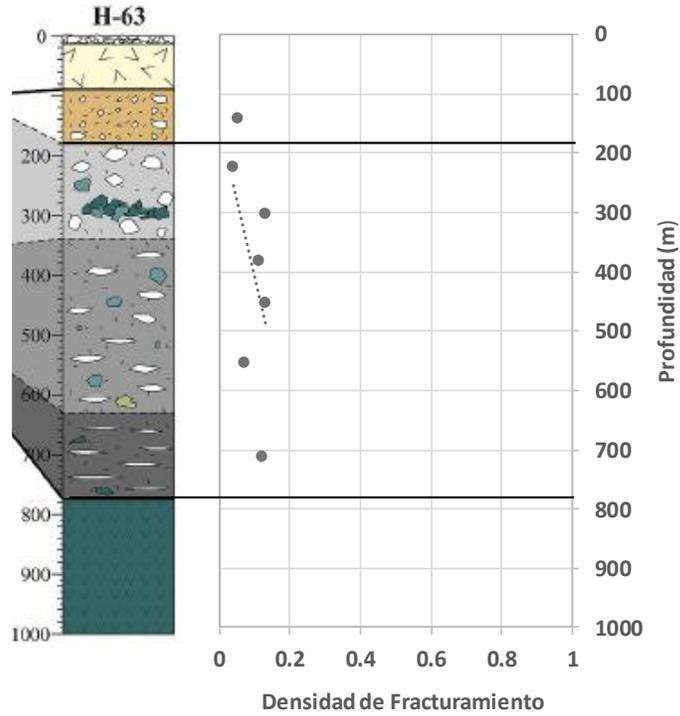
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H52



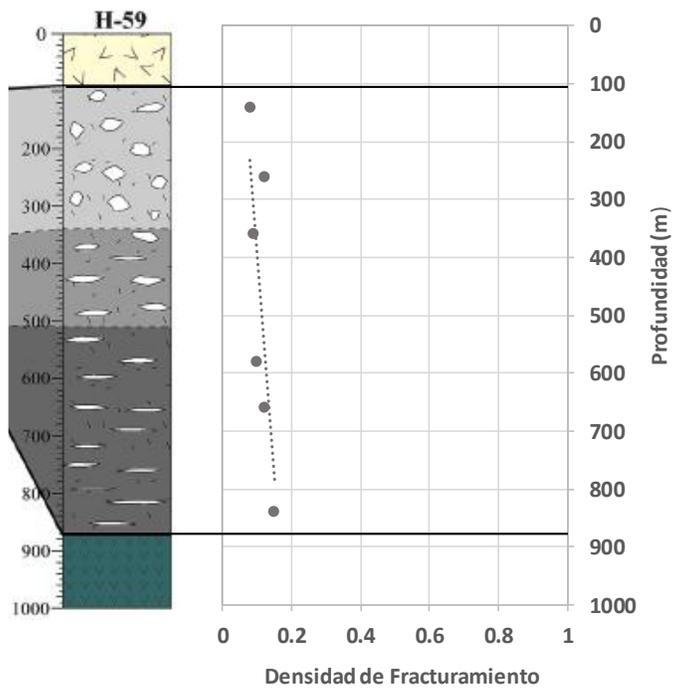
Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H55



Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H42



Variación vertical de la densidad de Fractura en la ignimbrita Xáltipan
POZO H59



ANEXO II

Archivos en formato .CSV necesarios para la carga de datos a *Leapfrog Geo*.

- Archivo *Collar.csv*

Hole ID	East	North	Elev	z_on_topography	Depth
H-5	660518.9	2175966	2758.46	2755.935	1905
H-8	661566.6	2176391	2778.32	2770.288	2388
H-10	662066.5	2176382	2829.167	2837.904	2158
H-19	662866.7	2176653	2811.66	2802.092	2300
H-20	663315	2177505	2844.07	2824.022	2400
H-25	666383.1	2176186	2798.648	2795.942	2300
H-26	663116.6	2175453	2863.821	2862.965	2546
H-42	663300.2	2173505	2895.75	2889.331	2200
H-50	663540	2173032	2932.029	2935.628	2600
H-52	661011	2178905	2797	2781.157	1900
H-55	663319.4	2177691	2849.56	2824.523	2350
H-59	661581.7	2178401	2776.651	2777.201	2200
H-63	661241	2178065	2771.781	2775.613	2200

- Archivo *Survey.csv*

Hold ID	Deph	Dip	Azimuth
H-5	1905	90	0
H-8	2388	90	0
H-10	2158	90	0
H-19	2300	90	0
H-20	2400	90	0
H-25	2300	90	0
H-26	2546	90	0
H-42	2200	90	0
H-50	2580	90	0
H-52	1900	90	0
H-55	2300	90	0
H-59	2200	90	0
H-63	2200	90	0

- Archivo *Geology.csv*

Holeid	from	to	Strat	Lith
H-5	0	10	1	1
H-5	10	40	2	2.C
H-5	40	260	2	2.B
H-5	260	380	2	2.A
H-5	380	520	5	5
H-5	520	870	7	7.B.1
H-5	870	1200	7	7.A.2
H-5	1200	1380	7	7.A.1
H-5	1380	1900	9	9
H-8	0	10	1	1
H-8	10	40	2	2.C
H-8	40	160	2	2.B
H-8	160	310	2	2.A
H-8	310	960	5	5
H-8	960	1440	7	7.B.1
H-8	1440	1660	7	7.A.2
H-8	1660	1870	7	7.A.1
H-8	1870	2120	8	8
H-8	2120	2280	9	9
H-10	0	10	1	1
H-10	10	80	2	2.C
H-10	80	180	2	2.B
H-10	180	300	2	2.A
H-10	300	860	5	5
H-10	860	1180	7	7.B.1
H-10	1180	1700	7	7.A.2
H-10	1700	1940	7	7.A.1
H-10	1940	2130	8	8
H-19	0	10	1	1
H-19	10	90	2	2.B
H-19	90	180	2	2.A
H-19	180	500	5	5
H-19	500	1000	7	7.B.3
H-19	1000	1370	7	7.B.1
H-19	1370	2080	7	7.A.2
H-19	2080	2300	8	8
H-20	0	10	1	1
H-20	10	110	2	2.D
H-20	110	200	3	3

H-20	200	240	4	4
H-20	240	520	5	5
H-20	520	1020	7	7.B.3
H-20	1020	1830	7	7.B.1
H-20	1830	2240	7	7.A.2
H-20	2240	2400	8	8
H-25	0	10	1	1
H-25	10	180	2	2.D
H-25	180	220	3	3
H-25	220	280	4	4
H-25	280	500	5	5
H-25	500	1080	6	7.B.3
H-25	1080	1300	7	7.B.2
H-25	1300	2220	7	7.B.1
H-25	2220	2300	8	8
H-26	0	10	1	1
H-26	10	40	2	2.C
H-26	40	130	2	2.B
H-26	130	240	2	2.A
H-26	240	270	3	3
H-26	270	290	4	4
H-26	290	960	5	5
H-26	960	1240	7	7.B.2
H-26	1240	1520	7	7.B.1
H-26	1520	2060	7	7.A.2
H-26	2060	2540	8	8
H-42	0	10	1	1
H-42	10	120	2	2.C
H-42	120	360	2	2.A
H-42	360	420	3	3
H-42	420	820	5	5
H-42	820	1300	7	7.B.2
H-42	1300	1690	7	7.B.1
H-42	1690	2200	7	7.A.2
H-50	0	10	1	1
H-50	10	80	2	2.B
H-50	80	340	2	2.A
H-50	340	420	3	3
H-50	420	760	5	5
H-50	760	1210	7	7.B.2
H-50	1210	1840	7	7.B.1

H-50	1840	2600	7	7.A.2
H-52	0	20	1	1
H-52	20	70	2	2.E
H-52	70	540	5	5
H-52	540	1720	7	7.A.2
H-52	1720	1900	9	9
H-55	0	10	1	1
H-55	10	100	2	2.D
H-55	100	220	3	3
H-55	220	240	4	4
H-55	240	560	5	5
H-55	560	1070	7	7.B.3
H-55	1070	1640	7	7.B.1
H-55	1640	2280	7	7.A.2
H-59	0	10	1	1
H-59	10	90	2	2.E
H-59	90	860	5	5
H-59	860	1780	7	7.A.2
H-59	1780	2000	8	8
H-59	2000	2160	9	9
H-63	0	10	1	1
H-63	10	90	2	2.E
H-63	90	780	5	5
H-63	780	1780	7	7.A.2
H-63	1780	2200	9	9

- Archivo con los datos de fracturamiento: *fracture_density_points.csv*

holeid	X	Y	Z	DF
H-5	660540	2175950	2728.46	0.09
H-5	660540	2175950	2628.46	0.12
H-5	660540	2175950	2558.46	0.1
H-5	660540	2175950	2528.46	0.08
H-5	660540	2175950	2478.46	0.05
H-5	660540	2175950	2468.46	0.1
H-5	660540	2175950	2398.46	0.12
H-5	660540	2175950	2338.46	0.09
H-5	660540	2175950	2318.46	0.2
H-5	660540	2175950	2278.46	0.15
H-5	660540	2175950	2228.46	0.16
H-5	660540	2175950	2218.46	0.07

H-5	660540	2175950	2178.46	0.22
H-5	660540	2175950	2148.46	0.15
H-5	660540	2175950	2128.46	0.12
H-5	660540	2175950	2118.46	0.18
H-5	660540	2175950	2108.46	0.25
H-5	660540	2175950	2078.46	0.1
H-5	660540	2175950	2028.46	0.21
H-5	660540	2175950	1978.46	0.3
H-5	660540	2175950	1908.46	0.18
H-5	660540	2175950	1878.46	0.15
H-5	660540	2175950	1788.46	0.09
H-5	660540	2175950	1698.46	0.16
H-5	660540	2175950	1678.46	0.05
H-5	660540	2175950	1638.46	0.15
H-5	660540	2175950	1608.46	0.2
H-5	660540	2175950	1578.46	0.16
H-5	660540	2175950	1548.46	0.25
H-5	660540	2175950	1468.46	0.23
H-5	660540	2175950	1448.46	0.19
H-5	660540	2175950	1398.46	0.2
H-5	660540	2175950	1288.46	0.18
H-8	661582	2176392	2618.32	0.2
H-8	661582	2176392	2478.32	0.23
H-8	661582	2176392	2378.32	0.17
H-8	661582	2176392	2358.32	0.24
H-8	661582	2176392	2168.32	0.15
H-8	661582	2176392	1918.32	0.19
H-8	661582	2176392	1778.32	0.27
H-8	661582	2176392	1468.32	0.22
H-8	661582	2176392	1054.32	0.91
H-8	661582	2176392	898.32	0.23
H-8	661582	2176392	658.32	0.2
H-8	661582	2176392	628.32	0.13
H-8	661582	2176392	578.32	0.07
H-10	662081	2176381	2769.167	0.043
H-10	662081	2176381	2699.167	0.045
H-10	662081	2176381	2659.167	0.128
H-10	662081	2176381	2609.167	0.062
H-10	662081	2176381	2539.167	0.041
H-10	662081	2176381	2439.167	0.076
H-10	662081	2176381	2399.167	0.062

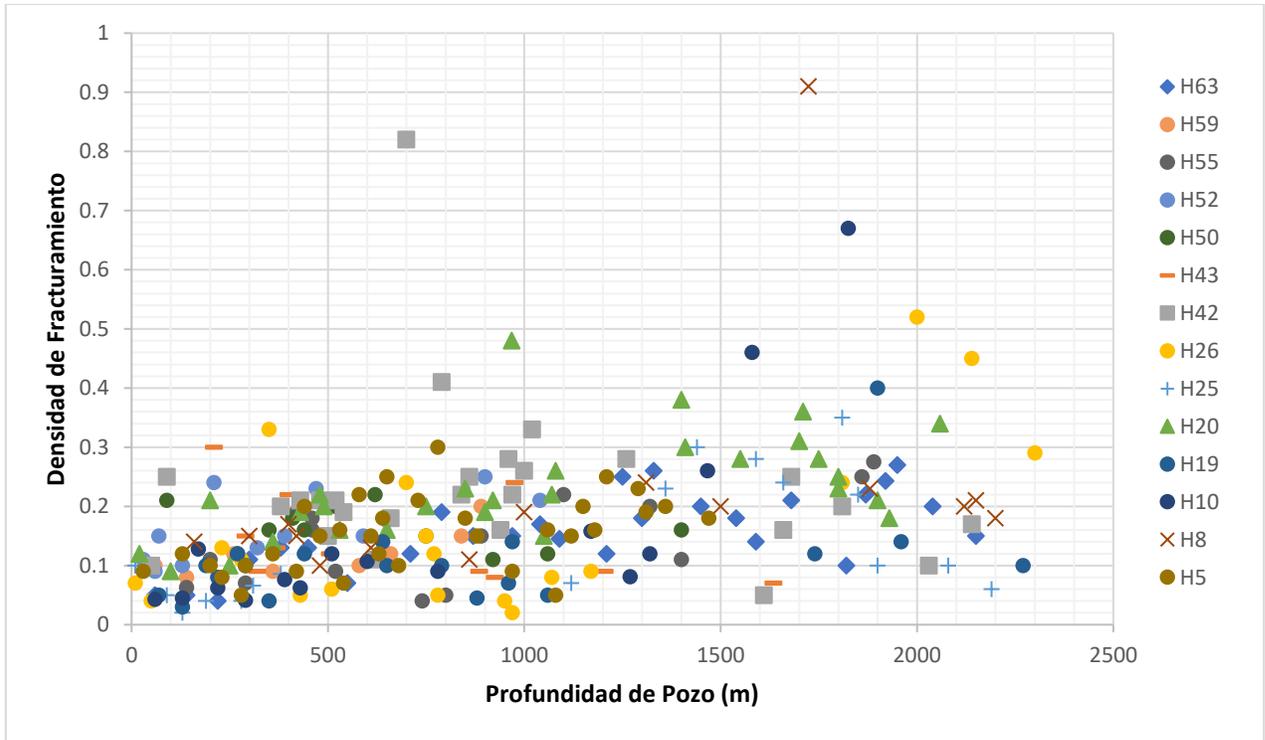
H-10	662081	2176381	2319.167	0.12
H-10	662081	2176381	2229.167	0.11
H-10	662081	2176381	2049.167	0.09
H-10	662081	2176381	1659.167	0.16
H-10	662081	2176381	1559.167	0.08
H-10	662081	2176381	1509.167	0.12
H-10	662081	2176381	1362.167	0.26
H-10	662081	2176381	1004.167	0.67
H-19	662881	2176643	2741.66	0.05
H-19	662881	2176643	2681.66	0.03
H-19	662881	2176643	2621.66	0.1
H-19	662881	2176643	2591.66	0.08
H-19	662881	2176643	2541.66	0.12
H-19	662881	2176643	2521.66	0.1
H-19	662881	2176643	2461.66	0.04
H-19	662881	2176643	2371.66	0.12
H-19	662881	2176643	2171.66	0.14
H-19	662881	2176643	2161.66	0.1
H-19	662881	2176643	2021.66	0.1
H-19	662881	2176643	1931.66	0.045
H-19	662881	2176643	1851.66	0.07
H-19	662881	2176643	1841.66	0.14
H-19	662881	2176643	1751.66	0.05
H-19	662881	2176643	1071.66	0.12
H-19	662881	2176643	911.66	0.4
H-19	662881	2176643	851.66	0.14
H-19	662881	2176643	541.66	0.1
H-20	663330	2177486	2824.07	0.12
H-20	663330	2177486	2744.07	0.09
H-20	663330	2177486	2644.07	0.21
H-20	663330	2177486	2594.07	0.1
H-20	663330	2177486	2484.07	0.14
H-20	663330	2177486	2414.07	0.19
H-20	663330	2177486	2364.07	0.22
H-20	663330	2177486	2354.07	0.2
H-20	663330	2177486	2314.07	0.16
H-20	663330	2177486	2194.07	0.16
H-20	663330	2177486	2094.07	0.2
H-20	663330	2177486	1994.07	0.23
H-20	663330	2177486	1944.07	0.19
H-20	663330	2177486	1876.07	0.48

H-20	663330	2177486	1924.07	0.21
H-20	663330	2177486	1794.07	0.15
H-20	663330	2177486	1774.07	0.22
H-20	663330	2177486	1764.07	0.26
H-20	663330	2177486	1444.07	0.38
H-20	663330	2177486	1434.07	0.3
H-20	663330	2177486	1294.07	0.28
H-20	663330	2177486	1144.07	0.31
H-20	663330	2177486	1134.07	0.36
H-20	663330	2177486	1094.07	0.28
H-20	663330	2177486	1044.07	0.23
H-20	663330	2177486	974.07	0.25
H-20	663330	2177486	944.07	0.21
H-20	663330	2177486	914.07	0.18
H-20	663330	2177486	785.07	0.34
H-20	663330	2177486	444.07	0.88
H-20	663330	2177486	442.07	0.55
H-25	666396	2176169	2788.648	0.1
H-25	666396	2176169	2708.648	0.05
H-25	666396	2176169	2668.648	0.02
H-25	666396	2176169	2608.648	0.04
H-25	666396	2176169	2518.648	0.04
H-25	666396	2176169	2488.648	0.066
H-25	666396	2176169	2418.648	0.086
H-25	666396	2176169	1678.648	0.07
H-25	666396	2176169	1438.648	0.23
H-25	666396	2176169	1358.648	0.3
H-25	666396	2176169	1208.648	0.28
H-25	666396	2176169	1138.648	0.24
H-25	666396	2176169	988.648	0.35
H-25	666396	2176169	948.648	0.22
H-25	666396	2176169	898.648	0.1
H-25	666396	2176169	718.648	0.1
H-25	666396	2176169	608.648	0.06
H-26	663133	2175459	2853.821	0.07
H-26	663133	2175459	2813.821	0.04
H-26	663133	2175459	2633.821	0.13
H-26	663133	2175459	2583.821	0.11
H-26	663133	2175459	2513.821	0.33
H-26	663133	2175459	2433.821	0.05
H-26	663133	2175459	2353.821	0.06

H-26	663133	2175459	2163.821	0.24
H-26	663133	2175459	2113.821	0.15
H-26	663133	2175459	2093.821	0.12
H-26	663133	2175459	2083.821	0.05
H-26	663133	2175459	1913.821	0.04
H-26	663133	2175459	1893.821	0.02
H-26	663133	2175459	1793.821	0.08
H-26	663133	2175459	1693.821	0.09
H-26	663133	2175459	1053.821	0.24
H-26	663133	2175459	863.8209	0.52
H-26	663133	2175459	723.8209	0.45
H-26	663133	2175459	563.8209	0.29
H-42	663320	2173500	2845.75	0.1
H-42	663320	2173500	2805.75	0.25
H-42	663320	2173500	2515.75	0.2
H-42	663320	2173500	2465.75	0.21
H-42	663320	2173500	2415.75	0.21
H-42	663320	2173500	2395.75	0.15
H-42	663320	2173500	2375.75	0.21
H-42	663320	2173500	2355.75	0.19
H-42	663320	2173500	2275.75	0.11
H-42	663320	2173500	2235.75	0.18
H-42	663320	2173500	2195.75	0.82
H-42	663320	2173500	2105.75	0.41
H-42	663320	2173500	2055.75	0.22
H-42	663320	2173500	2035.75	0.25
H-42	663320	2173500	1955.75	0.16
H-42	663320	2173500	1935.75	0.28
H-42	663320	2173500	1925.75	0.22
H-42	663320	2173500	1895.75	0.26
H-42	663320	2173500	1875.75	0.33
H-42	663320	2173500	1635.75	0.28
H-42	663320	2173500	1285.75	0.05
H-42	663320	2173500	1235.75	0.16
H-42	663320	2173500	1215.75	0.25
H-42	663320	2173500	1085.75	0.2
H-42	663320	2173500	865.75	0.1
H-42	663320	2173500	755.75	0.17
H-50	663536	2173024	2842.029	0.21
H-50	663536	2173024	2662.029	0.12
H-50	663536	2173024	2582.029	0.16

H-50	663536	2173024	2522.029	0.18
H-50	663536	2173024	2492.029	0.16
H-50	663536	2173024	2412.029	0.2
H-50	663536	2173024	2312.029	0.22
H-50	663536	2173024	2182.029	0.15
H-50	663536	2173024	2012.029	0.11
H-50	663536	2173024	1872.029	0.12
H-50	663536	2173024	1532.029	0.16
H-52	661011	2178905	2767	0.11
H-52	661011	2178905	2737	0.09
H-52	661011	2178905	2727	0.15
H-52	661011	2178905	2667	0.1
H-52	661011	2178905	2587	0.24
H-52	661011	2178905	2477	0.13
H-52	661011	2178905	2407	0.15
H-52	661011	2178905	2357	0.2
H-52	661011	2178905	2327	0.23
H-52	661011	2178905	2207	0.15
H-52	661011	2178905	1897	0.25
H-52	661011	2178905	1757	0.21
H-55	663314	2177721	2709.56	0.063
H-55	663314	2177721	2649.56	0.11
H-55	663314	2177721	2559.56	0.07
H-55	663314	2177721	2429.56	0.19
H-55	663314	2177721	2389.56	0.18
H-55	663314	2177721	2389.56	0.16
H-55	663314	2177721	2329.56	0.09
H-55	663314	2177721	2109.56	0.04
H-55	663314	2177721	2049.56	0.05
H-55	663314	2177721	1959.56	0.15
H-55	663314	2177721	1749.56	0.22
H-55	663314	2177721	1529.56	0.2
H-55	663314	2177721	1449.56	0.11
H-55	663314	2177721	989.56	0.25
H-55	663314	2177721	959.56	0.275
H-59	661594	2178389	2716.651	0.1
H-59	661594	2178389	2636.651	0.08
H-59	661594	2178389	2516.651	0.12
H-59	661594	2178389	2416.651	0.09
H-59	661594	2178389	2196.651	0.1
H-59	661594	2178389	2116.651	0.12

H-59	661594	2178389	1936.651	0.15
H-59	661594	2178389	1886.651	0.2
H-63	661155	2178053	2728.781	0.05
H-63	661155	2178053	2648.781	0.05
H-63	661155	2178053	2568.781	0.04
H-63	661155	2178053	2488.781	0.13
H-63	661155	2178053	2408.781	0.11
H-63	661155	2178053	2338.781	0.13
H-63	661155	2178053	2238.781	0.07
H-63	661155	2178053	2078.781	0.12
H-63	661155	2178053	1998.781	0.19
H-63	661155	2178053	1918.781	0.15
H-63	661155	2178053	1818.781	0.15
H-63	661155	2178053	1748.781	0.17
H-63	661155	2178053	1698.781	0.145
H-63	661155	2178053	1578.781	0.12
H-63	661155	2178053	1538.781	0.25
H-63	661155	2178053	1488.781	0.18
H-63	661155	2178053	1458.781	0.26
H-63	661155	2178053	1338.781	0.2
H-63	661155	2178053	1248.781	0.18
H-63	661155	2178053	1198.781	0.14
H-63	661155	2178053	1108.781	0.21
H-63	661155	2178053	968.7812	0.1
H-63	661155	2178053	918.7812	0.17
H-63	661155	2178053	868.7812	0.14
H-63	661155	2178053	838.7812	0.173
H-63	661155	2178053	748.7812	0.18
H-63	661155	2178053	638.7812	0.12



La gráfica muestra todas las densidades de fracturamiento de acuerdo con la profundidad en 14 de los pozos geotérmicos de Los Humeros.