

Evaluación de los controles estructurales del fracturamiento como base para la creación de un modelo de fracturas discreto (MFD) del yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz, Mich.

Gerardo Bermejo Santoyo^{1,4}, Adrián Jiménez Haro⁴, Sergio Manuel Nájera Blas^{1,4}, Alberto Vásquez Serrano² y Víctor Hugo Garduño Monroy^{3,4}

¹Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, INICIT, UMSNH, Morelia, Mich. ²Instituto de Geología, UNAM. ³Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH. ⁴CeMIE-Geo.

Correo: gerardobermejo.90@gmail.com

RESUMEN

Los modelos de redes de fracturas discretas se han utilizado principalmente en el área petrolera para la caracterización de yacimientos y para la modelación geohidrológica. Sin embargo, al ser una herramienta ideal para caracterizar sistemas de fracturamiento resulta factible su uso en la exploración y explotación geotérmica. La zona geotérmica de San Agustín del Maíz, Mich., se caracteriza por ser un área geológicamente compleja. Su basamento, conformado por andesitas, es afectado por tres principales sistemas de fallas y fracturas, el primero de ellos relacionado a los planos de enfriamiento de esta unidad litológica y con una orientación NE, seguido de un sistema de orientación NNW-SSE relacionado a la tectónica *Basin and Range* y por último se encuentra afectado por el Sistema de Fallas Morelia Acambay (SFMA), de dirección preferencial ENE-WSW, y sus diferentes fases. La unidad basal es sobrejacida por una secuencia ignimbritica y productos piroclásticos que también se presentan afectados por ambos sistemas de fallas. El objetivo de este trabajo es caracterizar los sistemas de fracturamiento y crear una red de estas estructuras mediante datos de campo, para cuantificar estadísticamente la distribución espacial, intensidad y deformación histórica de las unidades rocosas en múltiples escalas, para que los resultados sirvan como base para alimentar un modelado numérico del flujo de fluidos en las rocas del yacimiento.

Los resultados muestran que el fracturamiento de las rocas que conforman el yacimiento geotérmico presentan un P_{10} con distribución de espacios que siguen una ley de potencia fractal con un exponente de frecuencia acumulada de 1.26 para fracturas E-W, 1.14 para las ENE-WSW y 1.79 para las NNW-SSW, lo que indica que las primeras son las más persistentes. Los datos para el cálculo de P_{21} arrojan que las fracturas de enfriamiento tienen longitudes menores a 20 cm mientras que las ENE-WSW y NNW-SSE llegan a ser de varios metros. La intensidad del fracturamiento resulta ser de un 57% para las estructuras E-W, seguido por un 25% de las ENE-WSW y un 18% para las NNW-SSE. El análisis bidimensional de mapas de fracturas de orientación E-W para tres dimensiones fractales arroja valores de dimensión de caja (D_{caj}) de entre 1.2 y 1.67, dimensión de masa (D_{mas}) de 1.511 y 2.698, lacunaridad de 14.48 a 100.24 y una dimensión de correlación (D_{cor}) de 1.305 a 1.762. Por su parte, los mapas N-S presentan valores de $D_{caj}=1.14$ a 1.5, $D_{mas}=1.479$ a 3.054, lacunaridad de 3.82 a 89.19 y $D_{cor}=1.109$ a 1.641. Este análisis preliminar indica que las rocas andesíticas que contienen al probable yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz presentan valores óptimos de P_{32} de intensidad de fracturamiento por unidad de volumen.

Palabras Clave: Geología estructural, análisis de fracturamiento, análisis estadístico, dimensiones fractales, lacunaridad.

Assessment of structural controls as the base to build a Discrete Fracture Model (MFD) of geothermal reservoir at San Agustín del Maíz, Mich.

ABSTRACT

Models of discrete fractures networks have been used mainly in the oil and gas industry for characterizing reservoirs and hydrologic modeling. Being a suitable tool to characterize fracturing systems, these models can also be applied to geothermal exploration and exploitation. The geothermal area of San Agustín del Maíz, Mich., is geologically complex. Its andesitic basement is affected by three main faults and fractures systems. The first one is related to the cooling surfaces of the andesitic flows and presents NE orientation. The second has NNW-SSE trend and is related to the Basin and Range tectonics. The third system shows a main ENE trend and is part of the Morelia-Acambay Fault System with its three phases. The basal unit is overlain by an ignimbritic sequence and pyroclastic products that are also affected by the two main fault systems. The main objective of this paper is characterize the fracture systems and create a fracture network supported by field data to statistically quantify the space-distribution, intensity and historic deformation of the rock units at multiple scales. These results can be used to feed a numerical model of fluid flow into the reservoir rocks.

Results show that fracturing of the host rocks have P_{10} with spaces distribution that follow a fractal-power law with exponent of accumulated frequency of 1.26 for E-W fractures, 1.14 for ENE-WSW and 1.79 for NNW-SSE. This shows that the first set of fractures is the most persistent. Data to calculate the P_{21} factor indicate that cooling-fractures have lengths of less than 20 cm, while the ENE-WSW and NNW-SSW trending sets have fractures up to some meters long. The frequency of fracturing is 57% for E-W fractures, followed by a 25% for ENE-WSW structures and 18% for the NNW-SSE set. Bi-dimension analysis of maps of E-W fractures for the three fractal dimensions indicate values of box-dimension (D_{caj}) of between 1.2 and 1.67, mass dimension (D_{mas}) of 1.511 and 2.689, lacunarity of 14.48 to 100.24 and correlation dimension (D_{cor}) of 1.305 to 1.762. N-S fractures maps present D_{caj} values of 1.14 to 1.5, D_{mas} of 1.479 to 3.054, lacunarity of 3.82 to 89.19 and D_{cor} of 1.109 to 1.641. This preliminary analysis concludes that the andesitic rocks containing the probable geothermal reservoir of San Agustín del Maíz present optimal values of P_{32} of fracture intensity per unit of rock volume.

Keywords: Structural geology, analysis of fracturing, statistical analysis, fractal dimension, lacunarity.

INTRODUCCIÓN

Las fallas y fracturas se forman como resultado de la acción de esfuerzos y de la manera en que estos varían en el tiempo (Hatcher, 1995 *in* Vázquez-Serrano, 2011) a partir de pequeñas imperfecciones llamadas fisuras (Griffith, 1920) y su geometría dependerá de la resistencia de la roca y de la intensidad de deformación. Para su análisis se requieren observaciones sistemáticas (Vázquez-Serrano, 2011). La importancia del análisis de los sistemas estructurales de los yacimientos, especialmente de las redes de fracturas, radica en conocer cómo estas controlan el ascenso de fluidos geotérmicos, para lo que es necesario conocer su arreglo, dirección y abundancia. Una herramienta útil para analizar las estructuras geológicas es la teoría fractal la cual contempla parámetros como densidad, intensidad, apertura, longitud, orientación y espaciamiento. La teoría fractal se caracteriza por la invarianza de escala de los objetos fractales representados mediante leyes de potencia a través de la dimensión de caja (D_{caj}), dimensión de correlación (D_{cor}), dimensión de masa (D_{mas}), lacunaridad y exponente de Lyapunov (Vázquez-Serrano, 2011). A partir de los parámetros fractales se pueden realizar representaciones de redes de fracturas en Modelos de Fracturas Discretos (MFD) para el análisis de los campos geotérmicos. Los Modelos de Redes de Fracturas Discretas (DFNM) son modelos estocásticos construidos mediante leyes de potencia y combinan datos de intensidad de fracturas de afloramientos (P_{21}) y de perforaciones (P_{10}). Se requiere estadística de intensidad para establecer el dominio de cada fractura y su variación espacial de acuerdo a la litología. Los modelos se basan en el trabajo de modeladores geológicos, incluyendo la zona de deformación (DZ), dominio de roca (RD) y los modelos de dominio fractura (FD). La importancia de la creación de un DFNM (Modelo de Red de Fracturas Discretas) radica en simular el flujo de fluidos dentro del yacimiento en condiciones que pueden ser más apegadas a la realidad.

La zona geotérmica de San Agustín del Maíz se localiza al norte de la ciudad de Morelia. Afloran rocas de composición andesítica y de edad miocénica (18 Ma) sobre la porción Centro-Sur del Lago de Cuitzeo, que se encuentra en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato, a una altura de 1840 msnm (Fig. 1.).

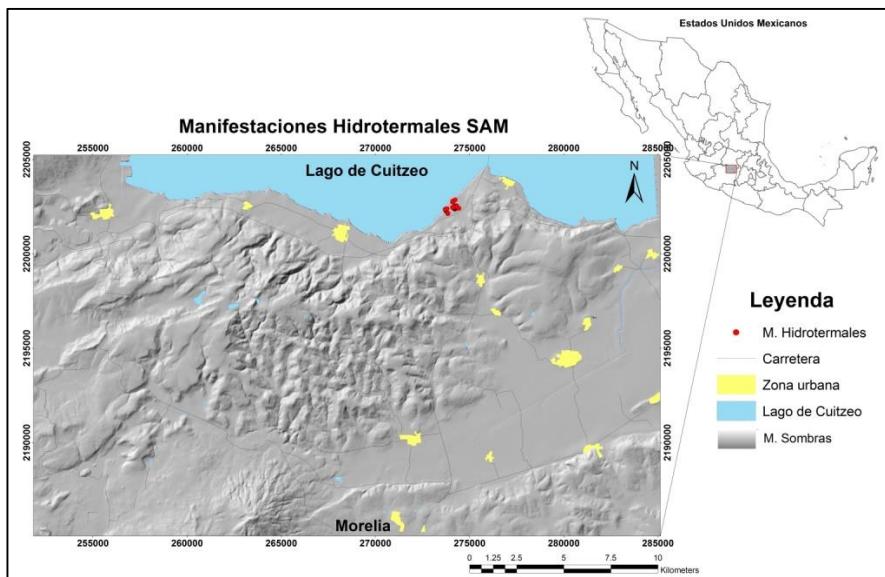


Figura 1. Localización de la zona geotérmica de San Agustín del Maíz (SAM). En color rojo se representan las manifestaciones termales.

Geología estructural y litología

Geológicamente el área de San Agustín del Maíz está compuesta por una alternancia de rocas andesíticas sobreycadas por una secuencia ignimbritica que a su vez es coronada por productos piroclásticos. Estructuralmente el área se encuentra dentro del dominio del Sistema de Fallas Morelia-Acambay (SFMA), caracterizado como un sistema distensivo que controla la formación del Lago de Cuitzeo. Este sistema está representado por grandes fallas normales de dirección preferencial E-W y ENE-WSW que buzan al Norte y basculan las unidades al Sur.

El basamento del área está conformado por la secuencia andesítica de Mil Cumbres que aflora al ESE de la ciudad de Morelia, de edad aproximada de 23-14 Ma (Gómez-Vasconcelos, 2012). En relación a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz, esta unidad aflora entre la ciudad de Morelia y San Agustín en la denominada Falla Tarímbaro. Se le considera como la unidad que alberga al probable yacimiento geotérmico. La unidad andesítica es afectada por dos sistemas de fallas principales. El primero y más antiguo corresponde al *Basin and Range* representado por fallas normales y normales de rumbo, de dirección NNW-SSE y NW-SE, activo desde el Oligoceno hasta el Pleistoceno Temprano. La segunda fase de deformación corresponde al SFMA activo desde el Plioceno Temprano hasta el presente, identificado por fallas normales y normales de rumbo (generalmente izquierdo) de dirección E-W y ENE-WSW que se vuelven lístricas a profundidad. Este sistema reactiva, desplaza y elimina el sistema antiguo y genera estructuras tipo graben. Finalmente, la secuencia ignimbritica que le sobreycace es afectada por ambos sistemas de fallas, pero en menor proporción el que corresponde al *Basin and Range*.

Metodología

La metodología desarrollada para el análisis del fracturamiento de la zona geotérmica de San Agustín del Maíz consistió en trabajo de campo y trabajo de gabinete. El trabajo de campo se realizó aplicando técnicas de la teoría fractal en afloramientos encontrados dentro de la zona de estudio. El análisis fractal se realiza sobre planos bien expuestos de fallas y fracturas donde se consideran aspectos del fracturamiento como orientación, espaciamiento, apertura, densidad, intensidad y longitudes de fracturas tomadas en tres diferentes escalas a partir de ventanas circulares y líneas de muestreo. Este proceso se basa en la clasificación de fracturas en torno a familias, es decir, de acuerdo a su orientación, mismas que son identificadas en el área circular. La intensidad está representada por el número de fracturas que intersectan el perímetro del círculo sin importar su orientación, mientras que la densidad se obtiene a partir de líneas de muestreo trazadas perpendicularmente a cada familia y sobre la cual se mide el espacio existente entre cada fractura. Una parte del análisis fractal está basado en el análisis de planos 2D a partir de fotografías de afloramientos tomadas de forma paralela al plano.

El trabajo de gabinete consistió en un análisis estadístico a partir de los aspectos levantados en campo para las tres dimensiones tomadas (1 m, 10 cm y 1 cm), del cual se obtuvieron histogramas de frecuencias contra espaciamiento para cada familia de fracturas, distribución de fracturas e histogramas de longitud y aperturas de fracturas. El análisis fractal se realizó mediante la elaboración de mapas de fracturas a través de fotografías las cuales fueron binarizadas y analizadas en programas como Spheristat V.3, Corel Draw V.7, FracAnalysis, Fractlyse y FracLac.

Finalmente, a partir de algunos de los parámetros utilizados por la teoría fractal se obtuvieron y evaluaron aspectos de intensidad y densidad de fracturamiento que alimentarán un modelo de redes de Fracturas Discretas (DFN). Los modelos DFN toman parámetros en función de la intensidad de fracturamiento conocidos como P_{10} , P_{21} , y P_{32} , y de la orientación de las fracturas, obtenidos a partir de la identificación de cada red de fracturas a las cuales se les tomó el rumbo respecto al norte y, el tamaño de fracturas, que fue medido solo en aquellas fracturas cuyo inicio y final pudo ser identificado en el afloramiento.

Resultados

El análisis fractal del fracturamiento desarrollado en la zona geotérmica de San Agustín del Maíz se realizó en dos de las unidades que conforman su litología. Una es la unidad andesítica, que se considera como el basamento local de la zona y la roca que alberga al probable yacimiento geotérmico. La otra es la unidad ignimbritica que sobreyace a las andesitas.

El análisis muestra que ambas unidades se encuentran afectadas por dos sistemas de fracturas perpendiculares entre sí, de dirección NNW-SSE y ENE-WSW. El primer sistema está relacionado con el *Basin and Range* mientras que el otro es parte del SFMA. En el caso de las andesitas se identificó también un sistema de fracturas de dirección E-W, que va de sub-horizontal a horizontal, producto del enfriamiento durante su formación. De acuerdo a observaciones de campo y al análisis estadístico se encontró que la unidad andesítica se encuentra mayormente fracturada en comparación con las ignimbritas. Las andesitas muestran una intensidad de fracturas de 57% para las fracturas de enfriamiento, de 25% para las fracturas ENE-WSW y de 18% para las NNW-SSE. En el caso de las ignimbritas, el 83% de las fracturas son de dirección ENE-WSW y el 17% restante pertenecen a las NNW-SSE, representados en la Figura 2.

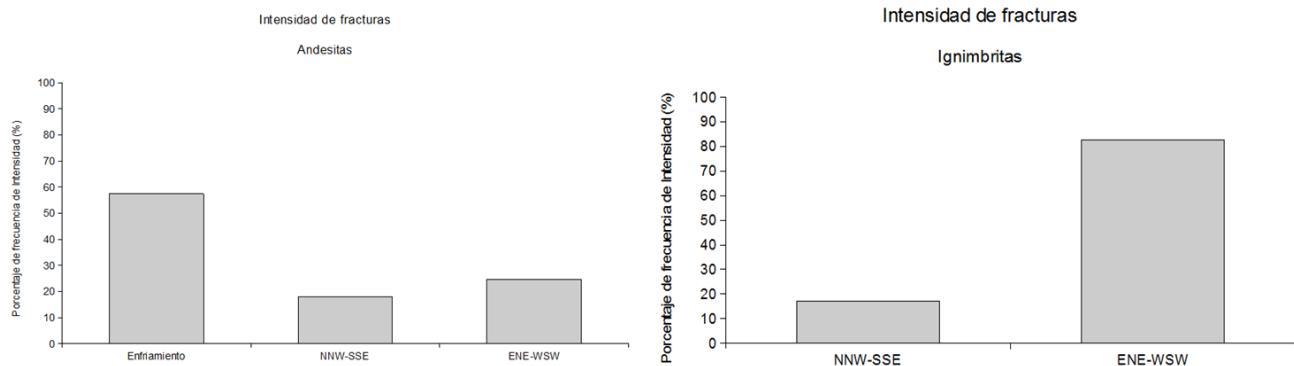


Figura 2. Gráfica de la intensidad de fracturas para las unidades andesítica e ignimbritica. A la izquierda, las andesitas presentan tres sistemas de fracturas de orientación E-W, ENE-WSW y NNW-SSE en orden de intensidad. Las ignimbritas, a la derecha, sólo son afectadas por dos sistemas de fracturas de orientación ENE-WSW y NNW-SSE en orden de intensidad.

Como indica el análisis, el último y aun activo SFMA afecta intensamente a las unidades en cuestión, obteniéndose valores de intensidad de fracturas por metro de $P_{10}= 50$ para las E-W, $P_{10} = 20$ para las ENE-WSW y $P_{10}= 15$ para las NNW-SSE en las andesitas. Por su parte, las ignimbritas presentan

valores de $P_{10}=10$ y dos fracturas por metro para las ENE-WSW y NNW-SSE, respectivamente, lo que indica que existen espacios grandes entre fracturas en esta unidad litológica. Fractalmente los sistemas de fracturas en ambas unidades siguen una ley de potencia, es decir, su arreglo se repite a varias escalas (Figura 3) con frecuencias acumuladas para las andesitas de 1.26, 1.14 y 1.79 para las fracturas E-W, ENE-WSW y NNW-SSE, respectivamente, mientras que para las ignimbritas las frecuencias son de 0.98 y 0.94 para fracturas ENE-WSW y NNW-SSE, respectivamente. El exponente de frecuencia acumulada está en función de la abundancia de fracturas, representando su espaciamiento la frecuencia acumulada, y también se conoce como dimensión de fragmentación.

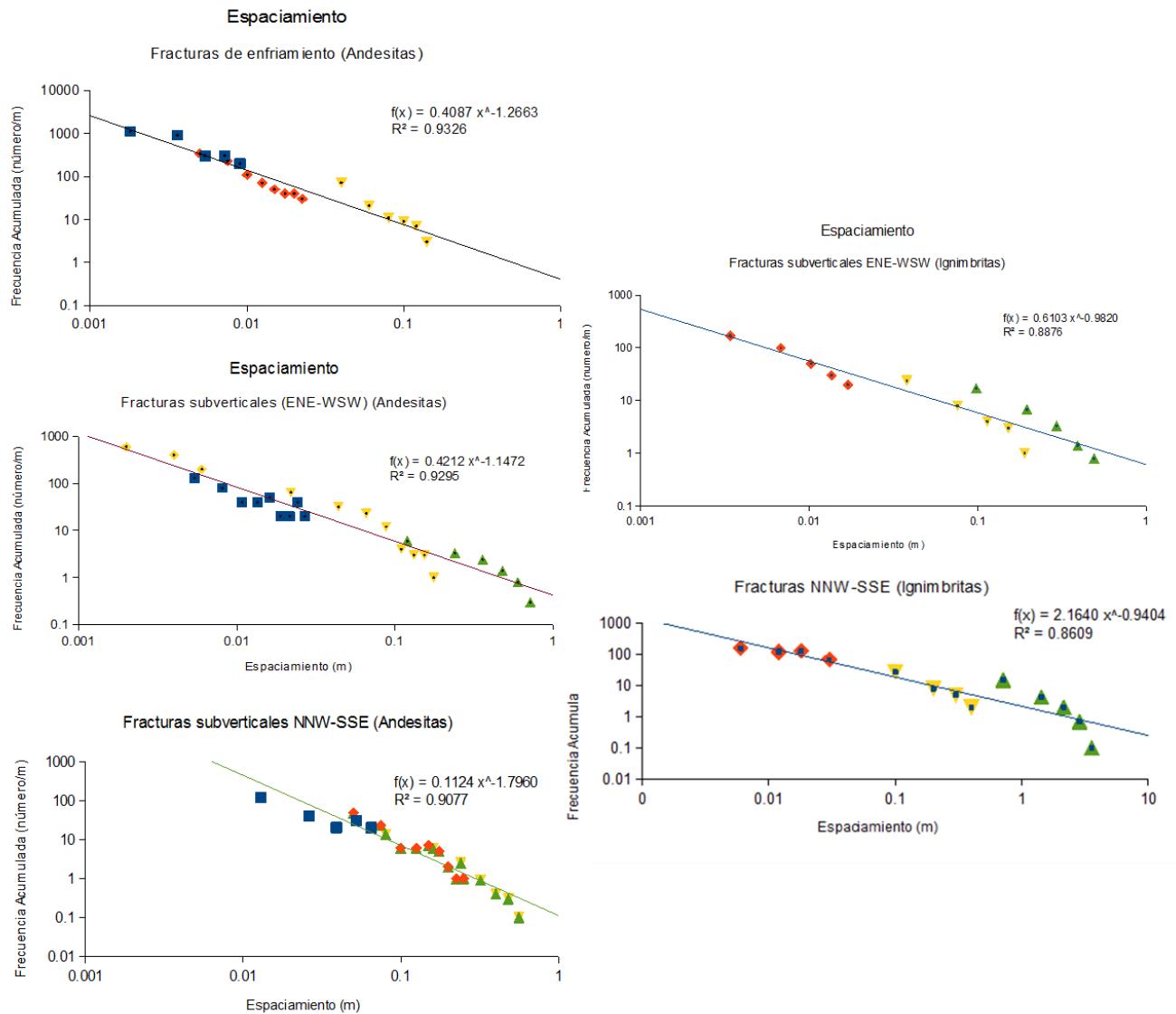


Figura 3. Gráficas correspondientes al análisis estadístico de la intensidad en andesitas (izquierda) e ignimbritas (derecha), mostrándose la frecuencia acumulada contra el espaciamiento. Cada gráfica incluye las tres escalas de intensidad (1 m, 10 cm y 1 cm). Los gráficos muestran que la intensidad de fracturas se ajustan a una ley de potencia, es decir son invariantes a la escala, por lo que se consideran fractales.

El tamaño de fracturas presentes en la zona geotérmica de San Agustín del Maíz varía de acuerdo a cada sistema de fracturas. Cabe mencionar que a nivel regional se puede observar una gran cantidad de fallas normales de varios kilómetros a lo largo del Lago de Cuitzeo, que corresponden principalmente al SFMA y que modelan la topografía de la zona. En menor medida se pueden observar muy escasas fallas pertenecientes al extinto sistema *Basin and Range*, como la falla regional Tzitzio-Valle de Santiago que atraviesa el Lago de Cuitzeo en dirección NW-SE. Localmente existen varias fallas secundarias pertenecientes a los sistemas de deformación mencionados anteriormente, aunque por el momento se desconoce su longitud.

A nivel afloramiento se obtuvieron las longitudes de las fracturas encontradas en los mismos. De este parámetro se puede decir que las fracturas de enfriamiento perteneciente a la unidad andesítica exhiben longitudes menores a 20 cm y se caracterizan por no seguir una ley de potencia. En el caso de los otros sistemas de fracturas pertenecientes tanto a la unidad andesítica como a la ignimbritica, se puede decir que las fracturas son sub-verticales y llegan a tener longitudes que van de centímetros hasta varios metros, superando el tamaño de los afloramientos, por lo que no se puede identificar su inicio y su fin.

Lo anterior ocasiona un problema al tratar de caracterizar el fracturamiento de escala mesoscópica. Por este motivo los valores de P_{21} para la elaboración del DFN se realizarán con base en fracturas con un orden de magnitud menor a los 5 m de longitud.

Análisis bidimensional de mapas

Se puede incluir el análisis bidimensional de mapas de fracturas mediante la teoría fractal al momento de realizar un DFN, pues este arroja valores relacionados a la permeabilidad en 2D. Esto lo hace a partir de fotografías, analizando la intensidad y distribución de las fracturas así como puntos medios e intersecciones de las estructuras, lo que le da una mejor representación a un modelado de fracturas discreto.

Para este análisis se elaboraron un total de 30 mapas de la unidad andesítica, 15 de planos N-S y 15 de dirección E-W. De los 15 mapas de cada orientación se elaboraron cinco mapas de 1 m^2 , cinco mapas de 10 cm^2 y cinco mapas de 1 cm^2 , con la finalidad de identificar la apertura o espesor real de las fracturas observadas en campo y darle mayorrealismo a esos parámetros. Los mapas se elaboraron a partir de fotografías que fueron binarizadas (blanco y negro) para calcular las dimensiones fractales ($D_{\text{caj.}}$, $D_{\text{cor.}}$, $D_{\text{mas.}}$, y lacunaridad) a través de los programas FracAnalysis, Fraclyse y FracLac.

Los resultados revelan que la dimensión de caja y la dimensión de correlación tienen valores similares. La primera mide el espacio que ocupan las fracturas y algo similar mide la dimensión de correlación, pero esta indica adicionalmente cómo se correlacionan en el espacio, es decir qué tan alejadas están unas de otras. El valor de ambas debe ser similar en las tres escalas para ser considerado fractal. La Figura 4 muestra la similitud de los valores obtenidos para los 30 mapas de cada dirección.

La dimensión de masa suele ser superior a 2 en algunos mapas, tanto en los N-S como en los E-W, lo que se relaciona con la apertura de la fractura. La dimensión de masa se relaciona con la densidad y

arreglo de las fracturas: a valores altos se tendrá una densidad alta y agrupamiento de fracturas. En los mapas E-W esta dimensión suele ser constante pero en los N-S aumenta con la escala (Figura 4).

Finalmente, la lacunaridad, que se relaciona con el tamaño y distribución de los huecos entre las fracturas, siempre es mayor a 1 lo que indica que los espacios entre fracturas tienen distintos tamaños y están distribuidos caóticamente (Figura 4). La lacunaridad es importante porque es uno de los parámetros fundamentales para estimar la permeabilidad en rocas fracturadas.

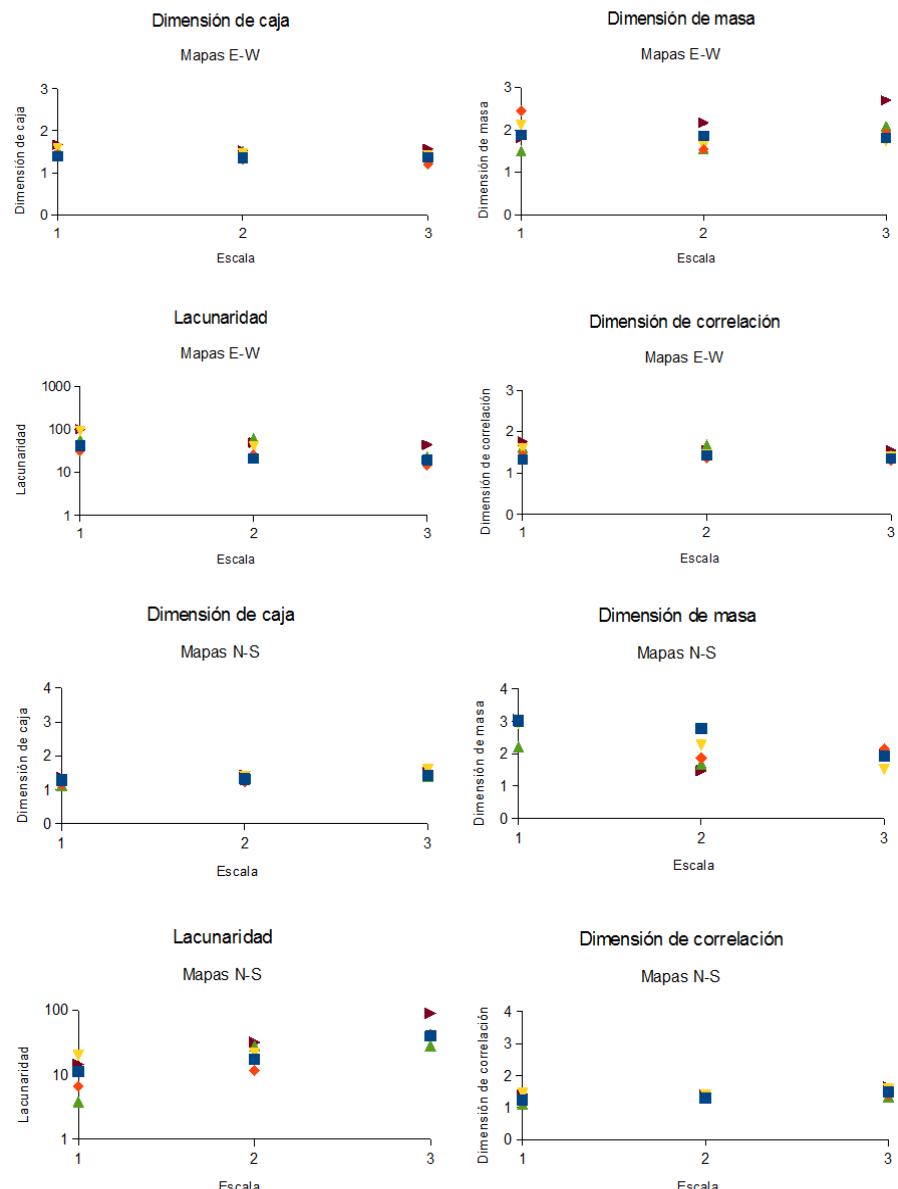


Figura 4. Gráfica correspondiente al análisis en 2D de los 30 mapas en tres escalas de planos de fracturas E-W (las cuatro gráficas superiores) y N-S (las cuatro gráficas inferiores) en andesitas. Las gráficas representan parámetros fractales de D_{caj} , D_{mas} , D_{cor} y lacunaridad. Se observa que la D_{caj} y D_{cor} tienen un comportamiento similar por lo que se consideran fractales, pero la D_{mas} es alta en ambos planos. Por tanto, las rocas tienen una densidad alta y un agrupamiento de fracturas mientras que la lacunaridad es grande en ambos planos, lo que quiere decir que existen grandes huecos distribuidos caóticamente. Los valores 1, 2 y 3 representan las escalas de 1 cm, 10 cm y 1 m, respectivamente.

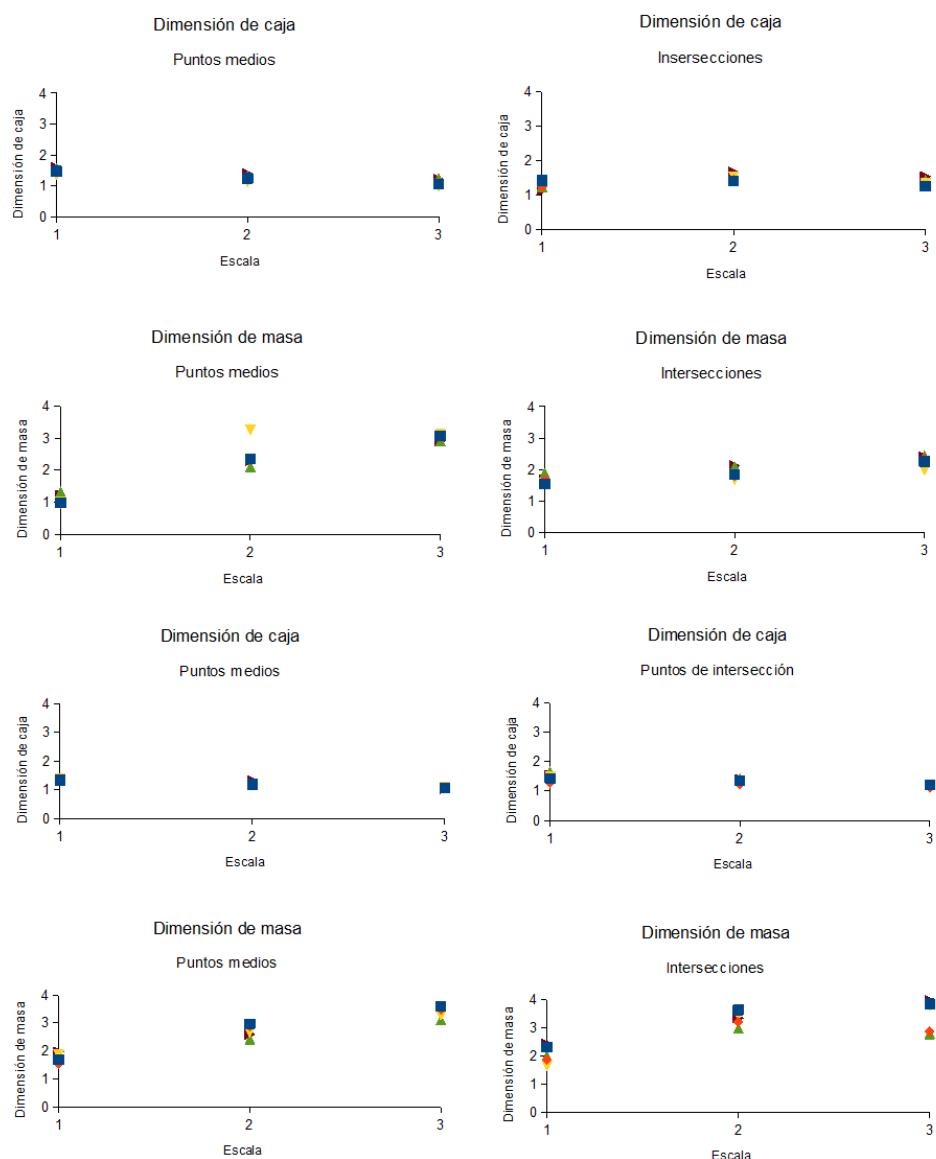
Mapas de puntos medios e intersecciones

Para estos parámetros se utilizaron sólo la dimensión de masa y la dimensión de caja. Estas variables permiten entender el proceso de flujo de fluidos en rocas fracturadas. Para el punto medio se consideró

el tamaño de la apertura o de la intersección, es decir, el diámetro del punto refleja la apertura en ese sitio.

Los resultados se muestran en la Figura 5, donde se observa que la dimensión de masa aumenta con la escala en los mapas de dirección E-W tanto en puntos medios como en intersecciones, pero lo hace de manera distinta. La dimensión obtenida da una idea de la densidad y distribución de los puntos medios y las intersecciones. De acuerdo a lo observado, a valores altos la distribución tiende a ser uniforme y la disminución en la dimensión de masa indica un agrupamiento de los puntos. La relación entre puntos medios e intersecciones se refleja por la dimensión fractal con la escala. Si aumenta la densidad de puntos medios también lo hará el número de intersecciones. Para la dimensión de caja los valores disminuyen al aumentarse la escala. Por su parte, los mapas N-S muestran un patrón similar a los E-W.

Figura 5. Gráfica correspondiente a puntos medios e intersecciones para planos E-W (las cuatro gráficas superiores) y N-S (las cuatro gráficas inferiores) en andesitas. Las gráficas pertenecen a D_{caj} y D_{mas} vs escala, y se puede observar que la dimensión de masa aumenta con la escala debido a la intensidad de fracturas mientras que la dimensión de caja disminuye al aumentar la escala. Esto representa la distribución de fracturas a mayores escalas. Los valores 1, 2 y 3 representan las escalas de 1 cm, 10 cm y 1 m, respectivamente.



Modelo de red de fracturas discretas (DFNM)

De acuerdo con los resultados presentados hasta ahora, se observa que es muy compleja la elaboración de un modelo DFN en la zona geotérmica de San Agustín del Maíz, pues además de los parámetros anteriormente mencionados se deben tomar en cuenta una gran cantidad de factores que modifican las condiciones del fracturamiento, los cuales deben ser contemplados por el software para que el modelo se ajuste lo más cercanamente posible a la realidad. Las redes de fracturas están siempre sujetas a cambios locales por presión y temperatura propias de los yacimientos hidrotermales, que alteran la permeabilidad debido a la precipitación y disolución de minerales (Sanyal *et al.*, 2000).

En la mayoría de los modelos propuestos para hidrocarburos se han utilizado datos obtenidos a partir de pozos, de los cuales se obtienen los parámetros en torno a la intensidad. Esto, sin embargo, limita parámetros como la longitud de fracturas pues carecen de afloramientos donde se pueda observar el inicio y final de las fracturas, por lo que se tienen que utilizar datos de sismogramas o de estudios de otro tipo para hacer más verídico el modelo. En nuestra propuesta, la ventaja radica en poder obtener estos parámetros en afloramientos superficiales y no en pozos. La Figura 6 ilustra un mallado 2D de redes de fracturas.

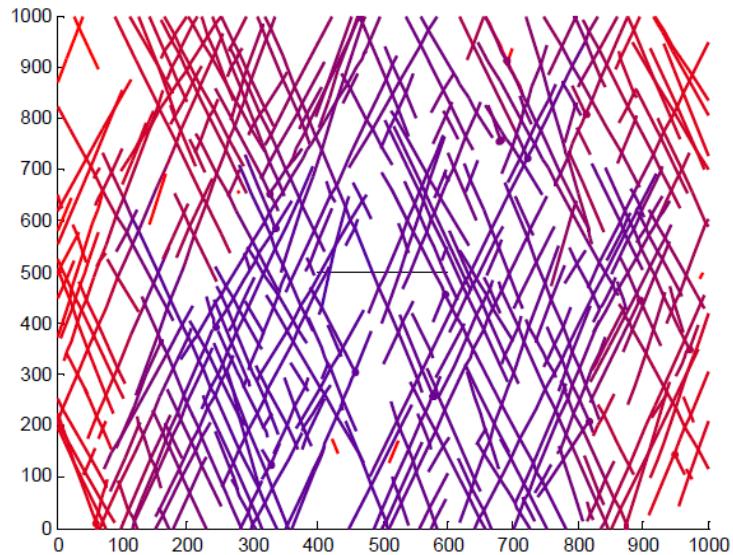


Figura 6. Ejemplo de un mallado 2D representando las orientaciones de fracturas (Tomada de McClure *et al.*, 2010).

Existen diversos simuladores utilizados para modelados de yacimientos geotérmicos hidrotermales como TOUGH2, TETRAD, STAR y FEHM. El simulador TOUGH2 es ampliamente utilizado en modelado de yacimientos hidrotermales y es un programa de simulación numérica multi-fásico y multi-componente para flujo de fluidos y calor en medios porosos fracturados (Pruess, 1991, en Sanyal *et al.*, 2000). TOUGH2 permite la simulación en 1D, 2D y geometrías 3D de medios porosos y fracturados (Sanyal *et al.*, 2000). La Figura 7 ejemplifica un modelo de red de fracturas discreto en 3D.

Conclusiones

A partir del análisis fractal se obtienen buenos valores para la generación de un modelo DFN, pues la intensidad de fracturamiento o P_{10} tiene valores superiores a 15 fracturas por metro representadas en

fracturas de longitudes o P_{21} , que van de pocos centímetros a varios metros, correspondientes a los tres sistemas de fracturas identificados con dirección E-W, ENE-WSW y NNW-SSE. También se obtuvieron parámetros de puntos medios o apertura y de intersección de fracturas realizados sobre planos 2D de fotografías y cuyos valores harán que el DFN se asemeje más a la realidad.

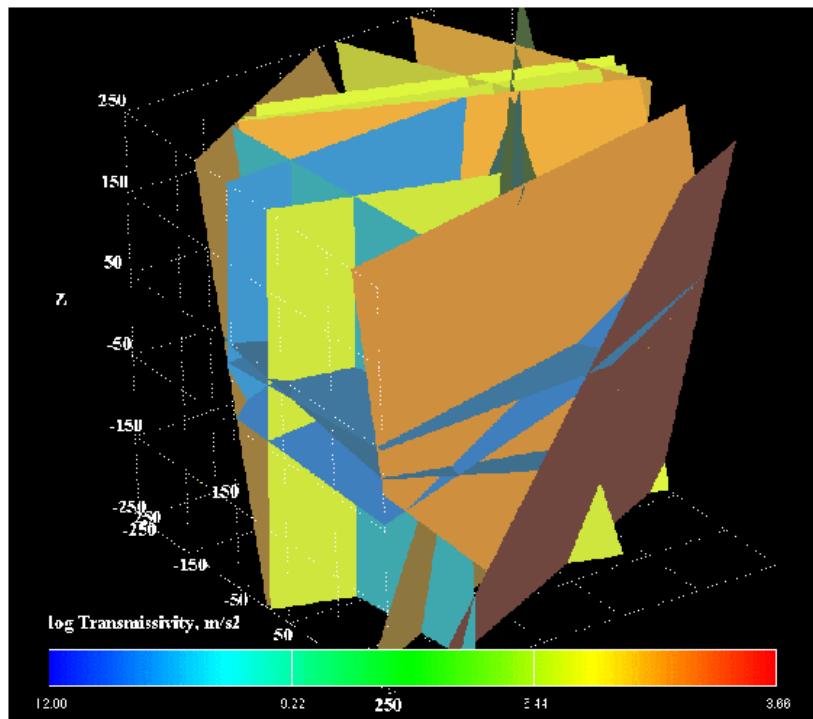


Figura 7. Ejemplo de un modelo DFN en el que cada color representa un sistema de fracturas diferente (Tomada de Poteri et al., 2003, en Dershowitz et al., S/A).

A partir del análisis fractal se puede concluir que:

- La unidad andesítica es la más fracturada. Esto es importante pues se le considera como la roca huésped del probable yacimiento geotérmico en el subsuelo de San Agustín del Maíz. La unidad presenta tres sistemas de fracturas: fracturas sub-horizontales (probablemente de enfriamiento y/o relajación) de dirección E-W, fracturas sub-verticales de orientación ENE-WSW, relacionadas con fallas normales del mismo rumbo, y fracturas sub-verticales de dirección NNW-SSE relacionadas con fallas normales y laterales derechas.
- Las ignimbritas, que sobreyacen a las andesitas, presentan un fracturamiento menor, siendo afectadas por dos redes de fracturas sub-verticales de rumbos ENE-WSW y NNW-SSE, mismas que se relacionan genéticamente con la deformación de las andesitas.
- Las andesitas presentan mayor intensidad de fracturamiento, siendo las fracturas E-W las más abundantes, seguidas por las fracturas de dirección ENE-WSW y las NNW-SSE, con porcentajes de 57, 25 y 18 respectivamente.
- El análisis fractal arroja un buen índice de correlación y caja para las andesitas, en términos de porosidad.

- Se considera que las fracturas de las rocas del probable yacimiento geotérmico en el subsuelo de la zona de San Agustín del Maíz tienen un comportamiento fractal, por lo que las redes de fracturas pueden ser correlacionables a profundidad.
- Los resultados muestran que el análisis del fracturamiento responde a un comportamiento fractal. Sin embargo para realizar el DFNM es necesario considerar los dominios de roca y de fracturas en el yacimiento, por lo cual es conveniente llevar a cabo este trabajo.

Referencias

- Dershowitz, W.S., P.R. La Pointe, and T.W. Doe, S/A. *Advances in Discrete Fracture Network Modeling*. Golder Associates, Inc. 13 p.
- Elmo, D., S. Rogers, D. Stead, and E. Eberhardt, 2014. *Discrete Fracture Network approach to characterise rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling*. Institute of Materials, Minerals and Mining and The AusIMM. Vol. 123, No. 3. 13 p.
- Fox, A., and P. La Pointe, 2007. *Statistical geological discrete fracture network model*. Forsmark modeling stage, 2.2., 269 p.
- Fox, A., P. La Pointe, J. Hermanson, and R. Munier, S/A. *Assessing Geological Control by Fracture Orientation and Intensity For Discrete Fracture Network Modeling*. Golder Associates.
- Gómez-Vasconcelos, M.G., 2012. Geología y estratigrafía volcánica de la Sierra de Mil Cumbres. Tesis de maestría. UMSNH-INICIT. Morelia, Mich. México. 151 p. Inédito.
- Griffith, A.A., 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Sciences Academy*, 221, pp. 163-198.
- McClure, M.W. and R.N. Horne, 2010. *Discrete Fracture Modeling of Hydraulic Stimulation in Enhanced Geothermal Systems*. Notes of the Stanford Geothermal Program, 19 p.
- Sanyal, S.K., S.J. Butler, D. Swenson, and B. Hardeman, 2000. *Review of the state-of-the-art of numerical simulation of enhanced geothermal systems*. 6 p.
- Vásquez-Serrano, A., 2013. Análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en modelos de flujo fluidos. Tesis de Maestría, UNAM, 156 p. Inédito.