

Aplicación de nuevas técnicas de caracterización estructural para la exploración de yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados

Adrián Jiménez Haro^{1,2} y Víctor Hugo Garduño Monroy^{3,4}

¹ Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, CeMIE-Geo. ² ENES-MORELIA-UNAM.

³ Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, ⁴ UMSNH.

Correo: adrianjharo@hotmail.com

RESUMEN

Se realizó una recopilación de algunas de las técnicas que durante las últimas décadas se han aplicado a nivel mundial, tanto para la caracterización de yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados (YGNM), como para yacimientos de hidrocarburos de la misma naturaleza (YNF). El objetivo radica en entender y considerar las herramientas disponibles en la caracterización estructural de los YGNF. Entre las técnicas descritas se destaca la clasificación de dominios de fracturamiento, que toma en cuenta los dominios de roca (DR), la evolución del campo de esfuerzos a través del tiempo y la presencia de estructuras geológicas que cambian el régimen de esfuerzos local. Así mismo, se describe la importancia del uso de técnicas estadísticas de caracterización como es el análisis fractal del fracturamiento, y técnicas que describen la evolución del yacimiento, como es la diagénesis estructural aplicada en vetas de origen hidrotermal, así como técnicas utilizadas para definir zonas favorables para el flujo de fluidos mediante el conocimiento del campo de esfuerzos actual. Una vez que el fracturamiento de un yacimiento ha sido analizado considerando algunas de estas técnicas de caracterización estructural, se procede con la elaboración de un modelo numérico mediante software especializado el cual define la interacción del flujo de fluidos a través de las unidades litológicas que conforman al yacimiento.

Palabras clave: Dominios de fracturamiento, análisis fractal, caracterización estructural, campo de esfuerzo, modelado numérico.

Application of new techniques of structural characterization for exploration of geothermal reservoirs naturally fractured

ABSTRACT

We made a compilation and review of some techniques applied worldwide in recent decades, both for characterizing naturally fractured geothermal reservoirs (NFG) as for hydrocarbon deposits of the same nature (NFR). The objective is to understand and consider the tools available in the structural characterization of NFG. Among the described techniques the classification of fracturing domains stands out, which includes rock domains (RD), stress field evolution through time and the presence of geological structures that change the local stress regime. Likewise, we describe the importance of using statistical characterization techniques such as fractal analysis of fracturing, and techniques that describe the reservoir evolution, such as structural diagenesis applied on veins of hydrothermal origin and techniques used to define favorable areas for fluid flow by defining the current stress field. Once the fracturing of the reservoir has been analyzed considering some of these techniques for structural characterization, we can develop a numerical model using specialized software, which defines the interaction of fluid flow through the lithological units that compose the reservoir.

Keywords: Fracturing domains, fractal analysis, structural characterization, stress field, numerical modeling.

Introducción

A nivel mundial existen numerosos estudios sobre la caracterización estructural de yacimientos naturalmente fracturados (YNF) realizados principalmente en el ámbito petrolero. Estos trabajos aplican técnicas que muestran resultados favorables, y hacen énfasis en el conocimiento de redes de fracturas y el campo de esfuerzos y su relación directa con el flujo de fluidos. Aunque las características físicas de los yacimientos petroleros difieren de las de los yacimientos geotérmicos, es importante considerar que el fracturamiento es el principal mecanismo de conducción de fluidos en el sistema. Por otra parte, pensamos que la aplicación de técnicas similares en yacimientos geotérmicos y la relación que guardan con el flujo de fluidos no se ha entendido en su totalidad, y a veces incluso se subestima el papel que juega el fracturamiento dentro del yacimiento geotérmico. La finalidad de este trabajo es describir técnicas y metodologías novedosas que se están utilizando en diversas partes del mundo para la caracterización estructural de yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados (YGNF). Estas técnicas proveen una visión adicional al origen del sistema de fracturas naturales, lo que contribuye a reducir de una manera considerable la incertidumbre en los modelos estructurales de fracturamiento relacionados con la permeabilidad secundaria y el flujo de fluidos.

Antecedentes

En las últimas dos décadas se han incrementado y mejorado los estudios que aplican técnicas novedosas para evaluar YNF y para la caracterización estructural de los yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados (YGNF). Paul La Point ha propuesto algunas de las técnicas de caracterización más relevantes en el ámbito de los YNF. Entre los diversos trabajos realizados por él durante 2007, 2008 y 2011, propone junto con Aaron Fox, a través de su compañía Golder Associates, Inc., un reporte técnico sobre la creación de un modelo de red de fracturas discretas (DFNM) mediante el uso del software *Forsmark modelling stage 2.2*. En este informe definen qué es un DFNM, sus usos y aplicaciones, así como las condicionantes para su creación. En sus demás informes La Point y Fox hacen referencia a los dominios de fracturamiento (Df), dominios de roca (Dr) y a muchos otros parámetros útiles en la modelación. Durante 2001, La Point realizó también estudios fractales en 2D de una red de fracturas en un yacimiento geotérmico del suroeste de Turquía, obteniendo resultados favorables.

Por otra parte, dentro de los estudios específicos enfocados geotermia, se encuentran los Zoback, quien ha obtenido avances importantes en la caracterización de los YGNF, principalmente enfocados a la determinación del estado de esfuerzos en campos geotérmicos (Boyle y Zoback, 2014). Así mismo ha publicado aplicaciones dentro del área de geomecánica enfocada a los yacimientos de hidrocarburos (Zoback, 2009).

Por último, los estudios más relevantes para la caracterización estructural mediante análisis fractal del fracturamiento en campos geotérmicos, son los de Babadagli (2001) y Jafari (2011). Estos estudios muestran que características de redes de fracturamiento como distribución, longitud, orientación y conectividad, que son mapeadas a diversas escalas en yacimientos geotérmicos, pueden ser caracterizadas mediante parámetros fractales.

Objetivo

El objetivo principal es dar a conocer y hacer una evaluación somera de las técnicas de caracterización estructural más empleadas en los últimos años tanto en YNF como en YGNF, y formular una metodología que pueda ser aplicada durante la exploración y explotación de los yacimientos geotérmicos.

Descripción de las técnicas de caracterización estructural

Algunos de los análisis y técnicas innovadoras que se han utilizado tanto en yacimientos de hidrocarburos naturalmente fracturados (YHNF, o también YNF) como en yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados (YGNF) se explican a continuación

Caracterización de dominios de fracturamiento (Df)

Un dominio de fracturamiento o de fractura (Df) se refiere a un volumen de roca en el yacimiento que tiene características geológicas homogéneas en relación con el desarrollo o presencia de fracturas naturales. El desarrollo del fracturamiento dentro de un mismo dominio es muy similar. Sin embargo, la variación de las propiedades de fractura entre uno y otro dominio es mucho mayor que la variación dentro de cada dominio individual. Las fracturas se caracterizan por su geometría, orientación, densidad, intensidad, etc., y por sus características de flujo (La Point, 2011).

La estrategia para identificar y caracterizar dominios, consiste en encontrar porciones del yacimiento que presenten geometría de fracturamiento, capacidad de flujo y características geológicas que son estadísticamente homogéneas (Fig. 1).

Concepto de Dominios

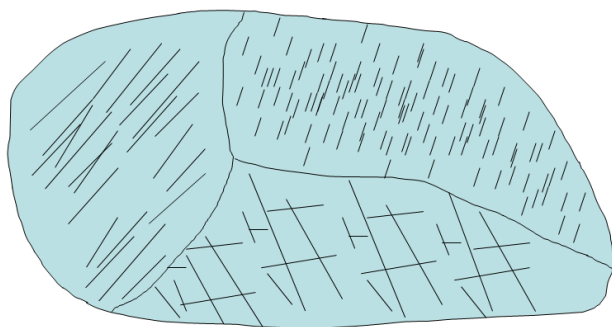


Figura. 1. Imagen que muestra la representación de un volumen de roca (yacimiento) donde se pueden definir tres dominios de fracturamiento (tomada de La Point, 2011).

La clasificación de dominios de fracturamiento se hace con base en criterios espaciales. El volumen que representa a las rocas del yacimiento se divide en zonas con distintas características litológicas y de fracturamiento. Las variaciones de los dominios de fracturas se encuentran estrechamente ligadas a diferentes condiciones, algunas de las cuales se mencionan a continuación.

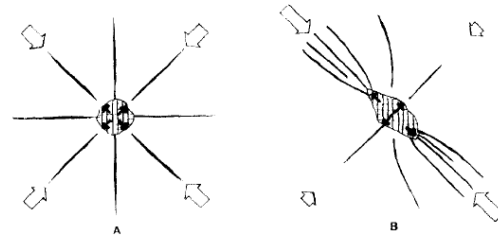
- Dominios de Roca (Dr)

Hay variaciones litológicas en todos los yacimientos geotérmicos y comúnmente están relacionadas al cambio litológico entre las unidades de roca que interactúan dentro del yacimiento. Cada diferente tipo de roca presenta usualmente una respuesta distinta al esfuerzo, generando diferencias en la geometría y en la densidad del fracturamiento. Por otro lado, los yacimientos geotérmicos emplazados en rocas sedimentarias, cuyas capas presenten diferencias de espesor y características mecánicas distintas, tendrán distintos patrones de fracturamiento (Fig. 2a).

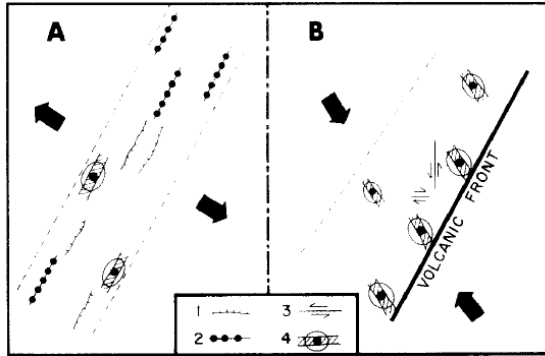
Así mismo la intrusión o extrusión de cuerpos volcánicos y subvolcánicos que están en interacción con el yacimiento, producen un cambio en el campo de esfuerzo local y por ende cambios locales en los patrones de fracturamiento (Fig. 2b y 2c).



a)



c)



b)

Fig.2. Imagen que ejemplifica los D_r y su relación con el fracturamiento. (a) Diferencia mecánica entre capas con geometría y valores de intensidad del fracturamiento distintos (Schopfer et al., 2011). (b) Interacción de los cuerpos volcánicos con el campo de esfuerzos regional. (c) Interacción del emplazamiento de cuerpos volcánicos con el esfuerzo horizontal H_s y la geometría de fracturas (Nakamura, 1977).

- Presencia de estructuras mayores (fallas regionales)

Las fallas de carácter regional que se afectan yacimientos geotérmicos cambian las condiciones de esfuerzos a nivel local, de manera que el número de fracturas aumenta considerablemente de acuerdo a la cercanía con la zona de falla, específicamente en la zona de daño (*damage zone*) (Fig. 3a y 3b). Esta característica es de relevancia ya que los dominios de fracturamiento cercanos a una zona de falla regional serán variables e independientes de la litología (Fig. 3c).

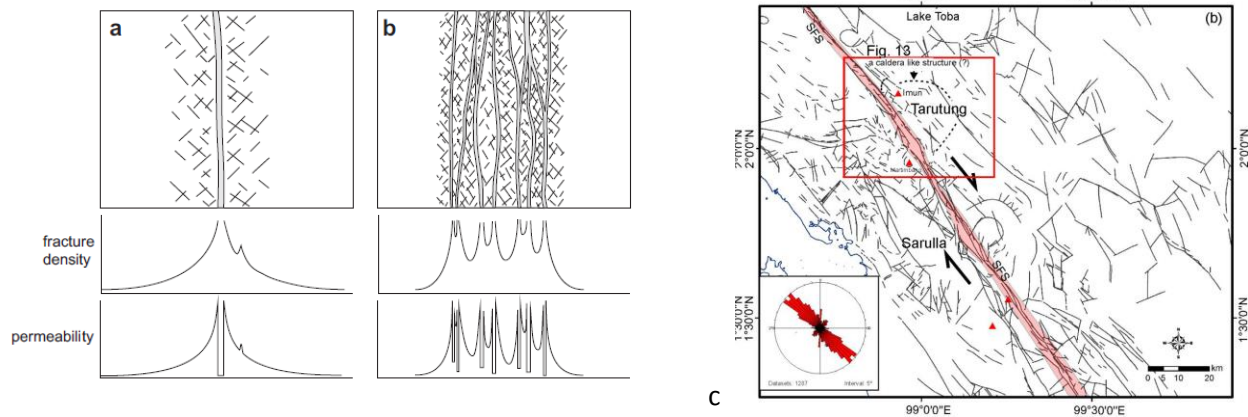


Fig. 3. Esquema que representa las propiedades físicas de una zona de falla (*damage zone*) (a) Un solo plano de falla, y (b) Varios planos de falla (Faulkner et al., 2010). (c) Delimitación del fracturamiento basado en un MDE. La línea color naranja representa el sistema de fallas Sumatra. Nótese como la densidad del fracturamiento varía respecto a la falla principal.

- Fases de deformación

Un estudio tectónico estructural de carácter regional para entender las fases de deformación en una zona de estudio ayuda a definir los dominios de fracturamiento temporal y espacialmente. Los resultados mostrarán las distintas fases de deformación a las que han estado sometidas las rocas del yacimiento y sus características de fracturamiento asociado a cada fase. Los errores más comunes se derivan de que en algunas ocasiones se hace la caracterización estructural tomando datos estructurales en las unidades geológicas o cuerpos volcánicos de edad más reciente, las cuales no reflejan el fracturamiento antiguo relacionado al yacimiento. Por lo tanto, la concepción del fracturamiento en el yacimiento será errónea.

- Zonas de alteración

La alteración hidrotermal cambia las propiedades físicas y mecánicas de la roca en contacto con los fluidos hidrotermales. Los dominios de roca en zonas alteradas serán distintos a los de la misma unidad en estado sano. Así mismo, las zonas de alteración influyen en los dominios de fracturas, pues las condiciones de fracturamiento en ellas serán bajas o nulas. Los métodos directos de prospección geofísica ayudaran a delimitar las zonas que se encuentren alteradas y que por lo tanto no presentaran las mismas características de fracturamiento.

Caracterización fractal del fracturamiento

Los fractales se han utilizado con mayor frecuencia en la caracterización de yacimientos petroleros cuyas características físicas son diferentes de los yacimientos geotérmicos. Sin embargo, las fracturas son estructuras comunes en diversos sistemas geológicos, por lo cual su análisis requiere de observaciones sistemáticas a varias escalas.

El estudio del comportamiento de las fracturas es muy importante debido a que estas actúan como conductos en el complejo proceso de flujo de fluidos (Jafari y Babadagli, 2011; Babadagli, 2002). Trabajos anteriores (Babadagli, 2002; Marrett et al., 1999; Turcotte, 2001; Barton y Larsen, 1985), muestran que las fallas y fracturas tienen un comportamiento auto-similar, es decir, su geometría se repite a varias escalas, que es lo que se conoce como un comportamiento fractal (Vázquez Serrano, 2011).

La caracterización fractal del fracturamiento se hace a partir de la obtención de parámetros de fracturas medidos en campo. Estos parámetros son: dirección, longitud de fractura, apertura, densidad e intensidad entre otros. Así como por datos obtenidos de imágenes de satélite y fotografías de afloramiento (Fig. 4).

Los datos de fracturamiento obtenidos en campo se clasifican en dos tipos. El primero de ellos hace referencia a las mediciones directas de fracturas, mientras que el segundo se realiza a partir de la elaboración de mapas estructurales en diferentes escalas, que después son binarizados.

Mediante estos datos se pueden realizar análisis estadísticos de los cuales se obtienen parámetros como son: dimensión de caja, dimensión de Masa (de puntos medios e intersecciones), conectividad, lacunaridad, densidad, intensidad y longitud de fractura entre otros. Estos parámetros se emplean en conjunto para caracterizar la relación espacial de las fracturas en el yacimiento.

Los resultados de un análisis fractal ayudan en la predicción de la distribución del fracturamiento en una unidad litológica de interés, por ejemplo, ayudando a determinar el espaciamiento, orientación,

geometría, densidad, intensidad y espesor de las fracturas, y por tanto a definir sus características como conductoras de flujo.

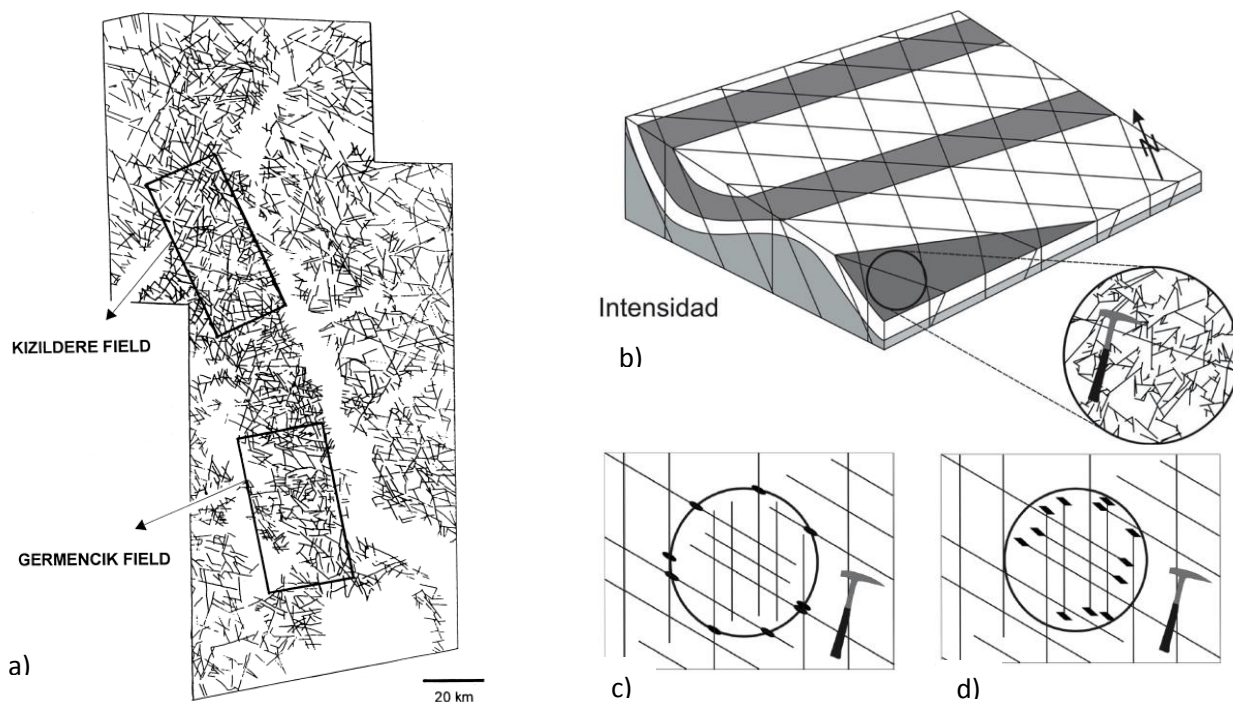


Figura 4. (a) Patrones de fracturamiento extraídos de una fotografía aérea (Babadagli, 2001). (b) Esquema de una ventana de muestreo circular. (c) Ventana circular donde se mide la intensidad de fracturamiento. (d) Ventana circular donde se mide la densidad de fracturamiento (Moreno et al., 2001).

Diagénesis estructural

Otra de las técnicas utilizadas en los últimos años para la caracterización estructural, y que se puede aplicar directamente a los YGNF, es el análisis microestructural de vetas de origen hidrotermal. Estas estructuras documentan la naturaleza de la relación entre el transporte de fluidos y la evolución de un yacimiento geotérmico.

La clasificación de los diferentes tipos de vetas se basa en la discriminación de la geometría del sistema, las características mineralógicas y el relleno dominante, las relaciones de corte entre ellas, su espesor y en algunos casos el análisis cinemático (Fig. 5).

El análisis microestructural, por su parte, se realiza en secciones delgadas de muestras de rocas de falla y/o en vetas. La descripción microestructural de las vetas se puede realizar tomando en cuenta dos aspectos principales en la morfología de las vetas, que son la morfología de los cristales y la morfología de su crecimiento, es decir del mecanismo principal mediante el cual se formó la veta durante el relleno de la cavidad por las soluciones hidrotermales que fluían a través de la fractura o la falla (Tabla 1).

Identificación de la morfología de los cristales	Identificación de la morfología de crecimiento
i. Vetas con textura en bloque o mosaico ii. Vetas con textura en bloques alargados iii. Vetas con textura fibrosa iv. Vetas con textura de cristales estriados v. Vetas con textura compuesta	i. Vetas sintaxiales ii. Vetas antitaxiales iii. Vetas compuestas

Tabla 1. Descripción microestructural de las vetas tomando en cuenta aspectos morfológicos.

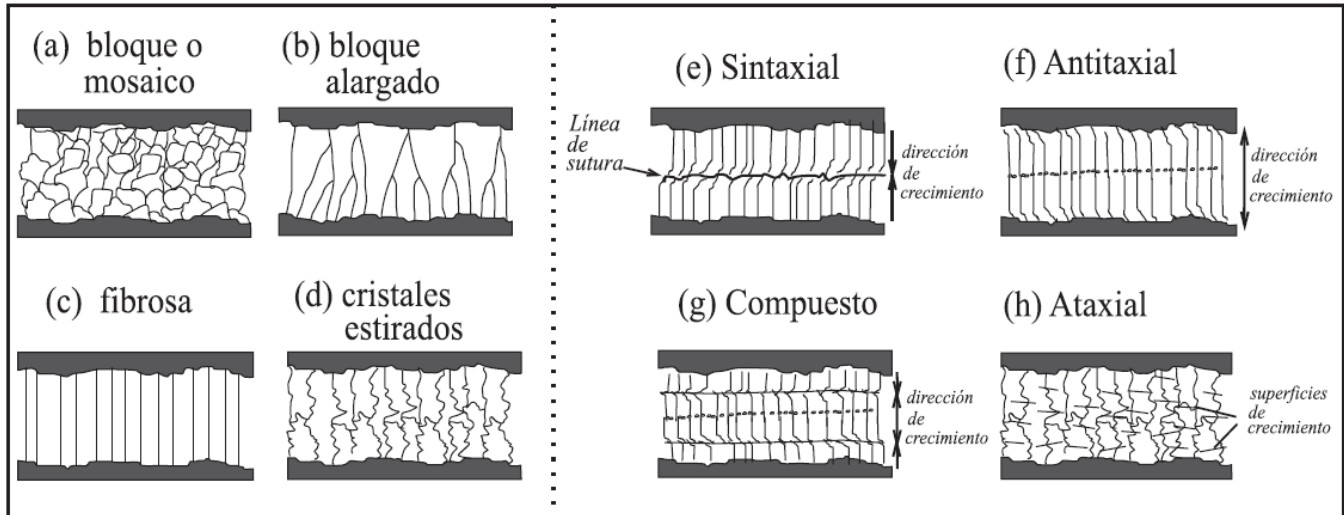


Fig. 5. Clasificación de vetas según la morfología de sus cristales (izquierda) y según la morfología del crecimiento (derecha). (a, b, c, d, tomadas de Kohn, 2000; e, f, g, h; tomadas de Ramsay y Huber, 1987) (Figura tomada de Olivares et al., 2010).

Una vez realizado el análisis cinemático de las vetas así como el análisis cinemático de los planos de falla, se procede a realizar los análisis geoquímicos, mineralógicos y de datación.

Los primeros revelan información de las condiciones de temperatura, profundidad y ambiente geológico en el que se formaron los minerales. El segundo se enfoca a identificar con certeza las características de los minerales que rellenan las vetas o planos de falla. Por último, la datación de los minerales es una herramienta más para conocer la historia del yacimiento y la interacción de los fluidos con los sistemas de fracturas a través del tiempo. Incluso es posible observar eventos tectónicos relacionados con la reapertura de conductos por donde los fluidos circulan.

Campo de esfuerzos

El acoplamiento hidromecánico en las masas de roca fracturadas es muy importante. Las masas de roca fracturadas se componen de materiales de roca intacta y fracturas, que son las principales vías de circulación de fluidos, especialmente en rocas duras y con escasa permeabilidad primaria. La abertura de las fracturas puede cambiar debido al cierre o a la apertura inducida por el esfuerzo normal o cortante. Por lo tanto la permeabilidad de los macizos rocosos fracturados depende directamente del esfuerzo.

En los yacimientos geotérmicos el acoplamiento indirecto, producto del movimiento de los fluidos hidrotermales en profundidad, ocasiona cambios locales en el esfuerzo mediante la presión de poro afectando directamente a las fracturas y favoreciendo su apertura.

Por otro lado, el acoplamiento directo estaría relacionado con el campo de esfuerzos que controla la zona en que se encuentra el yacimiento geotérmico, ocasionando que las fracturas que se encuentren orientadas favorablemente a este campo de esfuerzos tengan características asociadas a una mayor permeabilidad y flujo de fluidos (Fig. 6a).

Barton et al. (1988, 1995) han demostrado que las fracturas naturales orientadas en forma óptima con respecto al campo de esfuerzos actuante, y sometidas a esfuerzos críticos de corte, controlan la permeabilidad en áreas tectónicamente activas. Eso sugiere que las fracturas naturales sometidas a esfuerzos críticos serían las que más contribuyen al flujo de fluidos.

En este caso, se requiere un análisis detallado para construir modelos geológicos estructurales dinámicos, cinemáticos y si es posible modelos geomecánicos de los yacimientos. Estos modelos coadyuvan a determinar cuáles fracturas naturales están orientadas en forma óptima con respecto al campo de esfuerzos actuante, y además ayudan a decidir si están sometidas a esfuerzos críticos de corte. De esta manera se puede definir su rol en la contribución relativa al flujo de fluidos (Fig. 6b).

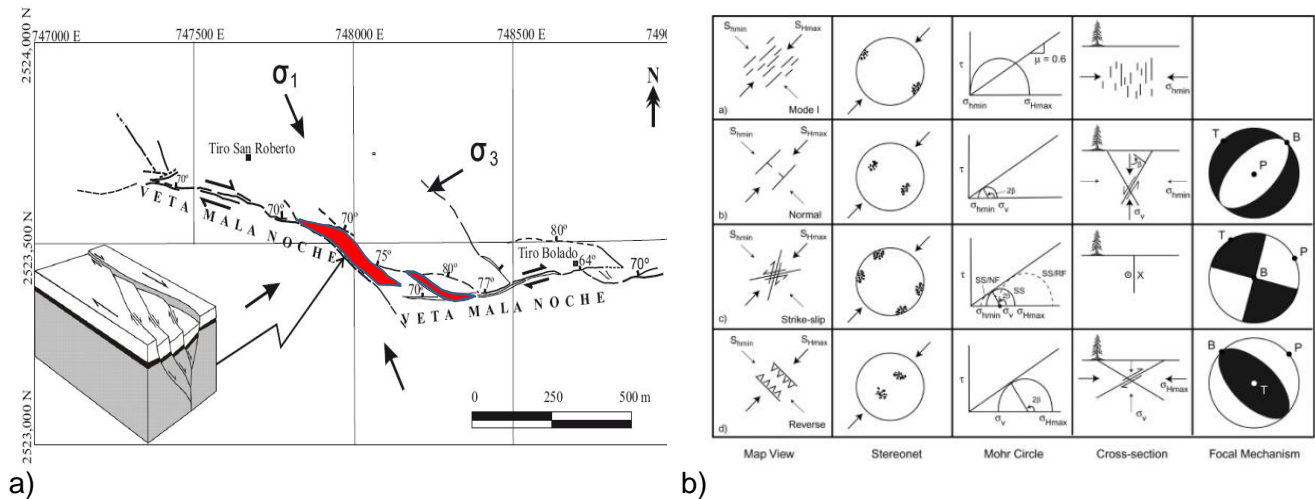


Figura 6. (a) Mapa estructural de la veta Mala Noche. En su porción central se aprecia una zona de tensión perpendicular a σ_3 y paralela a σ_1 , favorable al emplazamiento de fluidos hidrotermales y depósito de minerales. (b) Esquema que representa la interacción de H_{smax} y H_{smin} con respecto a estructuras geológicas y fallas.

Modelado numérico

Tomando en cuenta que la energía geotérmica depende del flujo de fluidos en las fracturas del yacimiento, en este apartado se hace una revisión de los parámetros geológicos necesarios utilizados en una simulación numérica del fracturamiento y del flujo de fluidos en un yacimiento geotérmico.

La aplicación de modelados numéricos a partir de datos y parámetros obtenidos en campo se realiza mediante programas especializados de software, entre los cuales destacan GEOTH3D, HDR, FRACSIM-3D, FRACSIM-2D, GEOCRACK 2D, TETRAD y TOUGH 2, entre otros. Elegir entre alguno de estos simuladores depende de la información disponible, y del tipo de resultados que se espera obtener. Por ejemplo, algunos de esos programas de simulación carecen de la capacidad de manejar flujo en dos fases. Así, no es inusual que se ocupen programas diferentes en diferentes etapas del desarrollo de un mismo proyecto.

- Modelo de red de fracturas discreto (DFNM)

El concepto general de un yacimiento consiste en un medio poroso con una red de facturas naturales que son altamente conductoras. El flujo depende de la apertura de la fractura que a su vez puede ser una función de la presión de fluido y la contracción térmica en la roca adyacente. Pruess (1990) discute acerca de cuándo el fracturamiento debe ser representado solo explícitamente y cuándo puede ser representado como continuo y eficaz. Para que el fracturamiento pueda representarse como continuo y eficaz, la matriz y las fracturas deben estar en equilibrio termodinámico, es decir deben existir gradientes relativamente bajos en la roca. Las características de los YGNF son ideales para el uso de modelos continuos, mientras que para los Yacimientos Geotérmicos Mejorados (EGS: Enhanced Geothermal Systems), la modelación explícita del fracturamiento es la mejor opción (Fig. 7).

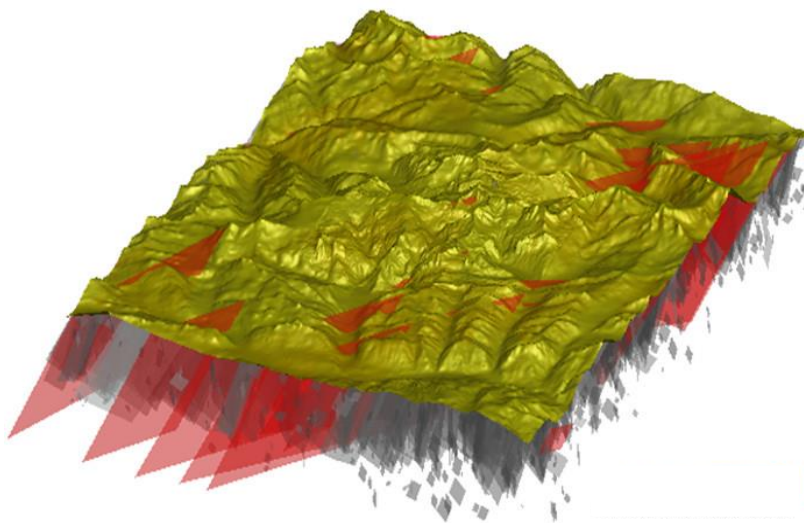


Fig. 7. Ejemplo de un modelo de red de fracturas discretas (DFNM), elaborado para ejemplificar el flujo de fluidos en un yacimiento (tomado de AMPHOS).

Para diseñar un DFNM durante la etapa de exploración es necesario contemplar por lo menos:

- Dominios de roca (D_r) del yacimiento,
- Dominios de fracturas (D_f),
- Orientación del campo de esfuerzos regional y local,
- Análisis estructural y fractal del fracturamiento

Por su parte, durante la etapa de explotación las características necesarias para una modelación requieren:

- Representación explícita de fracturas y representación continua de fracturamiento,
- Apertura de fracturamiento como función del esfuerzo efectivo,
- Deformación de cizalla y elevación asociada de las fracturas,
- Relación entre la apertura de la fractura y la conductividad incluyendo el potencial de flujo turbulento en las fracturas,
- “Canalización” y efectos termoelásticos,
- Deposición mineral y disolución,
- Un módulo de trazador,
- Flujo en dos fases y en consecuencia la complejidad del cambio de fase, permeabilidad relativa, efectos de la presión capilar, etc.

- Metodología para la caracterización estructural de los YGNF

Con base en el análisis de los resultados obtenidos en diversos estudios, se elaboró una metodología general para la caracterización estructural de los YGNF. Esta metodología incluye el uso y aplicación sistemática de las técnicas descritas anteriormente, en orden a su posible aplicación, de acuerdo a la secuencia siguiente:

1. Análisis tectónico-estructural regional (determinación del campo de esfuerzos)
2. Cartografía geológica y estructural a detalle
3. Clasificación de los dominios de roca (Dr)
4. Definición de los dominios de fracturamiento (Df)
5. Caracterización fractal del fracturamiento
6. Diagénesis estructural en vetas de minerales hidrotermales
7. Modelado numérico de redes de fracturas

Discusión

Aunque la aplicación de clasificaciones de dominios de fracturamiento (Df) y dominios de roca (Dr) propuestos por La Point y Foz ha sido principalmente en el área de prospección y desarrollo de campos petroleros, también es factible su uso en campos geotérmicos. Esto se debe a que los yacimientos geotérmicos no son homogéneos, como consecuencia de los diversos fenómenos que le dan origen, entre ellos la interacción con el emplazamiento de cuerpos volcánicos y subvolcánicos, el fallamiento a escala megaestructural y el desarrollo de zonas de alteración. Estos fenómenos y procesos pueden cambiar localmente los patrones de fracturamiento. Por otra parte, no todos los yacimientos geotérmicos se encuentran en zonas de rocas volcánicas, por lo que la interacción con rocas de distinta composición dará lugar a distintos dominios de fracturas.

Como lo mencionan Boyle y Zoback (2014), comprender el campo de esfuerzos regional es vital para caracterizar el fracturamiento favorable para la circulación de fluidos en un yacimiento geotérmico. Pero también identificar y comprender los cambios locales en las direcciones de σ_1 , σ_2 y σ_3 ayudará a definir mejor la red de fracturas conductoras de los fluidos en el yacimiento.

Los estudios sobre caracterización fractal de redes de fracturas en zonas geotérmicas realizados por Babadagli (2001), muestran resultados satisfactorios. Los resultados han encontrado una anomalía, lo que se define como un parámetro multifractal relacionado al cambio en orientación de las fracturas de un sitio a otro, dentro de un mismo bloque de las mismas características. Esto es lo que en este trabajo se definió como diferentes dominios de fracturamiento.

En ese contexto el papel de la componente σ_2 del campo de esfuerzos es muy importante, ya que es usualmente paralelo a las principales direcciones estructurales por donde es de esperar que circulen preferentemente los fluidos y que puede actuar como un conducto de ascenso de magmas que podrían dar lugar después a un yacimiento geotérmico de tipo hidrotermal.

Conclusiones

- La aplicación de técnicas innovadoras para la caracterización de yacimientos geotérmicos naturalmente fracturados (YGNF) amplía el conocimiento y reduce la incertidumbre en la conceptualización en el comportamiento del fracturamiento en el yacimiento.
- Prácticamente todas las técnicas de caracterización de los YGNF mencionadas pueden aplicarse tanto durante la etapa de prospección y como la de producción.

- La caracterización estructural de los YGNF reduce la incertidumbre y el riesgo en la localización de pozos exploratorios, productores e inyectores.
- La aplicación de técnicas de la industria petroleras en la caracterización estructural de los YGNF debe realizarse con cuidado y teniendo en cuenta restricciones derivadas de que ambos sistemas son distintos y presentan diferentes condiciones de presión y temperatura, por lo que las rocas y los fluidos se comportan de manera distinta.

Bibliografía

- Barton, C.A., Zoback, M.D. and Burns, K.L., 1988. In-situ stress orientation and magnitude at the Fenton geothermal site, New Mexico determined from wellbore breakouts. *Geophysical Research Letters*, Vol. 15, pp. 467-470.
- Barton, C.A., Zoback, M.D. and Moos, D., 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, Vol. 23, No. 8, pp. 683-686.
- Babadagli, T., 2002. Scanline method to determine the fractal nature of 2-D fracture networks. *Mathematical Geology*, 34 (6), pp. 647-670.
- Barton, C.C., and Larsen, E., 1985. Fractal geometry of two dimensional fracture networks at Yucca Mountain, south-western Nevada. *Proceedings of International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, Bjorkliden, Sweden, pp. 77-84.
- Boyle, K., and Zoback, M., 2014. The Stress State of the Northwest Geysers, California Geothermal Field, and Implications for Fault-Controlled Fluid Flow. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 104, No. 5, pp.
- Dershowitz, W., La Point, P., and Thomas, W., 2003. *Advances in Discrete Fracture Network Modeling*. Report of Golder Associates Inc.
- Elmo, D., Rogers, S., Stead, D. and Eberhardt, E., 2014. Discrete Fracture Network approach to characterize rock mass fragmentation and implications for geomechanical upscaling. Vol. 123, No. 3.
- Faulkner, D., Jackson, C., Lunn, R., Schilische, R., Shipton, Z., Wibberley, C., and Withjack, M., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32, pp. 1557-1575.
- Fox, A., La Point, P., Hermanson, J., Munier, R., and Babadagli, T., 2001. Fractal analysis of 2-D fracture networks of geothermal reservoirs in southwestern, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 112, pp. 83-103.
- Fox, A., La Point, P., Hermanson, J., and Ohman, J., 2007. *Statistical geological discrete fracture network model*. Forsmark modelling stage 2.2. SKB Rapport R-07-46.

- Fox, A., La Point, P., Hermanson, J., and Ohman, J., 2008. *Geological discrete fracture network model for the Laxemar site*. Site Descriptive Modelling SDM-Site Laxemar. SKB Rapport R-08-55.
- Fox, A., La Point, P., Hermanson, J., and Munier, R., 2005. Assessing Geological Controls on Fracture Orientation and Intensity For Discrete Fracture Network Modeling.
- Jafari, A., and Babadagli, T., 2011. Calculating equivalent fracture network permeability of multilayer-complex naturally fractured reservoirs. Paper SPE 132431, presented at *SPE Western Regional Meeting*, Anaheim, CA, May 27-29, 2011, 15 pp.
- Moreno-Sánchez, G., y García-Caballero, O., 2006. Caracterización cuantitativa de patrones de fracturamiento mediante ventanas circulares y análisis fractal.
- Olivares, V., Cembrano, J., Arancibia, G., Reyes, N., Herrera, V., y Faulkner, D., 2010. Significado tectónico y migración de fluidos hidrotermales en una red de fallas y vetas de un Duplex de rumbo: Un ejemplo del sistema de fallas Atacama. *Andean Geology*, 37 (2), pp. 473-479.
- Schopfer, M., Arslan, A., Walsh, J., and Childs, C., 2011. Reconciliation of contrasting theories for fracture spacing in layered rocks. *Journal of Structural Geology*, 33, pp. 551-565.
- Turcotte, D., 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, 1st Edition. Cambridge University Press. 221 p. Cambridge.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R., Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., e Yza-Guzmán, R., 2012. Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol. 64, núm. 3, pp. 353-367.
- Troger, U., Dominik, W., and Moeck, I., 2014. Geothermal exploration involving structural geology and hydrochemistry in the Tarutung Basin, Northern Central Sumatra (Indonesia). 111 p.
- Vásquez-Serrano, A., 2013. Análisis fractal de fracturas geológicas en un análogo expuesto de yacimientos carbonatados naturalmente fracturados y su aplicación en el proceso de flujo de fluidos. Tesis de Maestría, UNAM, 156 p. Inédito.