

INTERPRETACIÓN EN UN ESPACIO BIDIMENSIONAL DE LAS FALLAS GEOLÓGICAS EN LA SIERRA DE PACHUCA

J. C. Escamilla-Casas^{1,*}, E. Meneses-Meneses¹, E. Ortiz-Hernández¹, E. M. Uribe-Alcántara¹, E. Cruz-Chávez¹

¹Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, UAEH, Mineral de la Reforma, Hidalgo
* Autor de correspondencia: jocesca@uah.edu.mx

RESUMEN

Una carta geológica es una representación gráfica de la distribución de unidades litológicas y estructuras geológicas en el terreno. Por lo tanto, geoméricamente hablando, la extensión del mapa es un área que corresponde a un espacio bidimensional delimitado. Consecuentemente, mediante la geometría Euclidiana es posible determinar características como: la extensión del espacio bidimensional, las longitudes de los segmentos de rectas que definen la extensión de fallas geológicas y sus direcciones preferenciales; así como la intensidad, conectividad y densidad de las mismas. Estas características geométricas obtenidas a partir de la carta geológica, corresponden a la distribución real de fracturas en las rocas. Por lo tanto, la distribución espacial que exhiben estos rasgos, se asume que tienen algún tipo de orden que conforman al patrón espacial de las fracturas. En el presente trabajo, se presentan las etapas para la implementación del análisis bidimensional de la distribución de fallas cartografiadas en la Sierra de Pachuca. Los resultados preliminares sugieren la existencia de dos zonas de máxima densidad, las cuales pueden ser interpretadas como las zonas de recarga hidráulica de la Sierra de Pachuca. Los sectores con máxima conectividad se interpretan como las áreas que alojaron las mayores concentraciones minerales (Au-Ag).

Palabras Clave: Patrones de fractura, espacio bidimensional, conectividad, densidad, Sierra de Pachuca.

1. INTRODUCCIÓN

Un mapa se define como un diagrama, dibujo, o cualquier otra representación gráfica de la tierra o parte de ella; usualmente sobre una superficie plana, con determinadas características que pueden ser naturales, artificiales, o ambas y de acuerdo a una escala. Por lo anterior, se deduce que un mapa es un plano que, geoméricamente hablando, es un espacio bidimensional delimitado constituyendo así un espacio euclídeo. Particularmente, un mapa geológico es la representación gráfica de una extensión delimitada de terreno en la que se muestra la distribución de unidades rocosas y sus edades, las estructuras geológicas y sus datos estructurales, entre otros rasgos.

Tomando en cuenta lo anterior y combinándolo con el estudio de la deformación frágil en la Sierra de Pachuca, surge el objetivo de este trabajo: estudiar la distribución espacial de fallas y fracturas bajo los principios de la geometría euclidiana, para caracterizar los atributos y patrones de fractura en las rocas de la Sierra de Pachuca. En sustento de este objetivo, se considera la hipótesis de que el arreglo bidimensional de fallas y fracturas es una red de discontinuidades que reflejan el comportamiento mecánico de las rocas, mismas que fueron sujetas a los esfuerzos corticales responsables de su deformación frágil.

Dentro de los estudios geológicos más detallados que se han elaborado en la Sierra de Pachuca destaca el que elaboraron Geyne et al. [1]. Estos autores configuraron un mapa a escala 1:20,000 en el que se muestra una recopilación cartográfica de estructuras en superficie y subsuelo. En la actualidad, muchas de estas estructuras no son observables ya que han sido obliteradas por el desarrollo urbano o por la inaccesibilidad a túneles y demás obras mineras abandonadas o inactivas. Por las características anteriormente descritas, se tomó a dicho mapa como objeto para el análisis bidimensional desarrollado en el presente trabajo.

Para el análisis bidimensional, se implementó un procedimiento que consiste en obtener una imagen escaneada del mapa impreso, la digitalización de las fracturas, la conversión de archivos gráficos (.jpg) a formato de pares de datos (.svg). Finalmente, el procesamiento de los datos se realizó a través de las rutinas FracPAQ [2] modificadas por los autores y compiladas en MATLAB-R2016™. El producto final evalúa, mediante gráficos, los parámetros relacionados con la orientación y posición espacial, la relación de fracturas como una población y la cuantificación de la correlación espacial de objetos de longitud finita.

En el presente trabajo se llevaron a cabo los análisis de longitudes, direcciones, intensidad y densidad de fracturas y la estimación del tensor de fracturas. Los resultados indican que, en la Sierra de Pachuca, existen dos zonas de máxima densidad de fracturas. Lo cual se puede interpretar como las zonas de máxima recarga y como las zonas del subsuelo en donde hubo una mayor acumulación de los precipitados a partir de los fluidos mineralizantes en el Distrito Minero Pachuca Real del Monte.

Finalmente, la relevancia de este novedoso método de análisis, demuestra su amplia aplicabilidad, ya que no se restringe únicamente a mapas y estructuras geológicas mayores, sino también puede utilizarse en el análisis de imágenes de mapas a escala de afloramientos o de imágenes de láminas delgadas para estudios de petrografía, estudios de materiales artificiales, etc. Por otro lado, el procedimiento es fácil de seguir y la información de los resultados puede asistir en el análisis topológico de fracturas en cualquier medio. Es decir, los resultados incluyen estimaciones cuantitativas de las fracturas de manera individual (longitudes y orientación) así como las estimaciones de los atributos de toda la red de fracturas (conectividad, permeabilidad, etc.).

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento diseñado en este trabajo consiste en tres etapas. En la primera etapa, denominada de pre-proceso, se hizo la transformación de la información de fallas y fracturas mostradas en el mapa impreso a un archivo digital que contenga datos de coordenadas cartesianas, pares de datos x e y delimitados por tabulador. En otras palabras, se generó un archivo con extensión .svg (Scalable Vector Graphics, por sus siglas en inglés) a partir de un mapa impreso y de ahí se transformó a un archivo .txt. Para ello, inicialmente se obtuvo un archivo .jpg generado al escanear el mapa original impreso (figura 1). Posteriormente, se utilizó el programa computacional Adobe Illustrator CS2, para obtener un archivo .svg con la información de las fracturas mostradas en el archivo .jpg, digitalizadas en formato de líneas y polilíneas (figura 2). La conversión a texto delimitado por tabulador se puede realizar mediante una rutina sencilla en el sistema MacOS Sierra o utilizando un convertidor de uso libre en la red.

La segunda etapa se ha denominado como de codificación. En esta etapa, se utiliza la colección de programas (toolbox) FracPaQ [2] compilados en MATLAB-R2016™. Esta colección de programas al ser alojada en una plataforma de acceso libre en la red, permite ser manipulada y recodificada de acuerdo a los objetivos del análisis que persiga el usuario [3]. En este trabajo, se hicieron cambios en los programas relacionados con el análisis de longitudes, intensidades, mapas de densidades y estimación del tensor de fracturas; en los que se cambiaron las unidades de píxeles a unidades de medida del sistema métrico decimal [4].



Figura 1. Imagen (archivo con extensión .jpg) generada a partir del escaneo del mapa impreso publicado por Geyne [1]. La imagen ha sido modificada para eliminar la información cartográfica del mapa.

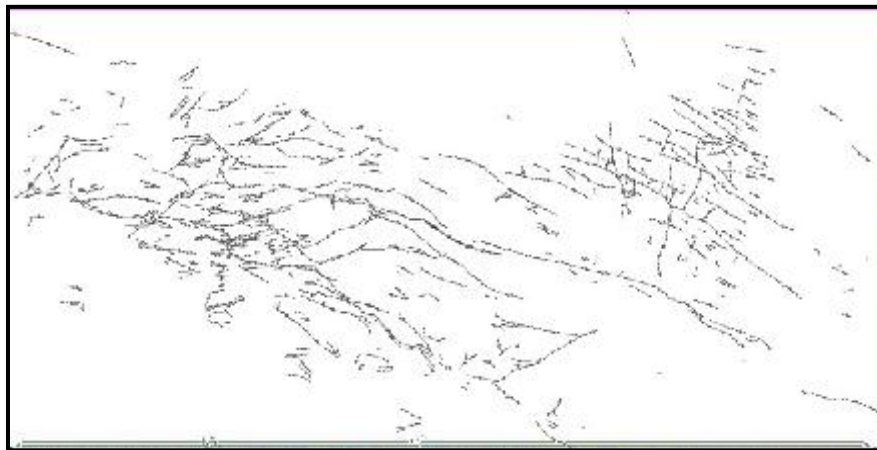


Figura 2. Imagen mostrando las líneas y poli-líneas que representan las fracturas en el mapa original. La imagen corresponde a la captura de pantalla del archivo .svg desplegado en la pantalla de la computadora.

Por otro lado, en el caso del mapa de Geyne [1], el mapa está proyectado en un sistema de coordenadas convencional, por lo tanto, se modificaron los parámetros de escala y fueron declarados en metros lineales atendiendo a las dimensiones reales de la cobertura del mapa. Para corroborar la efectividad de los cambios en la codificación de los programas a partir de los originales, primeramente, se obtuvo la imagen de las trazas de las fracturas en un marco de referencia correspondiente a las dimensiones del área del terreno que representa el mapa (figura 3). Para la estimación del tensor de fracturas, se adoptaron las ecuaciones descritas por Oda [5], pero se utilizaron únicamente tensores de segundo y cuarto orden.

Finalmente, se tiene la etapa de análisis, en esta etapa se efectuaron los análisis topológicos de longitudes y orientaciones preferenciales y los que corresponden a la interconectividad de las fracturas. Los análisis que se efectuaron son: los de intensidad, densidad y estimación del tensor de las fracturas [6] [7].

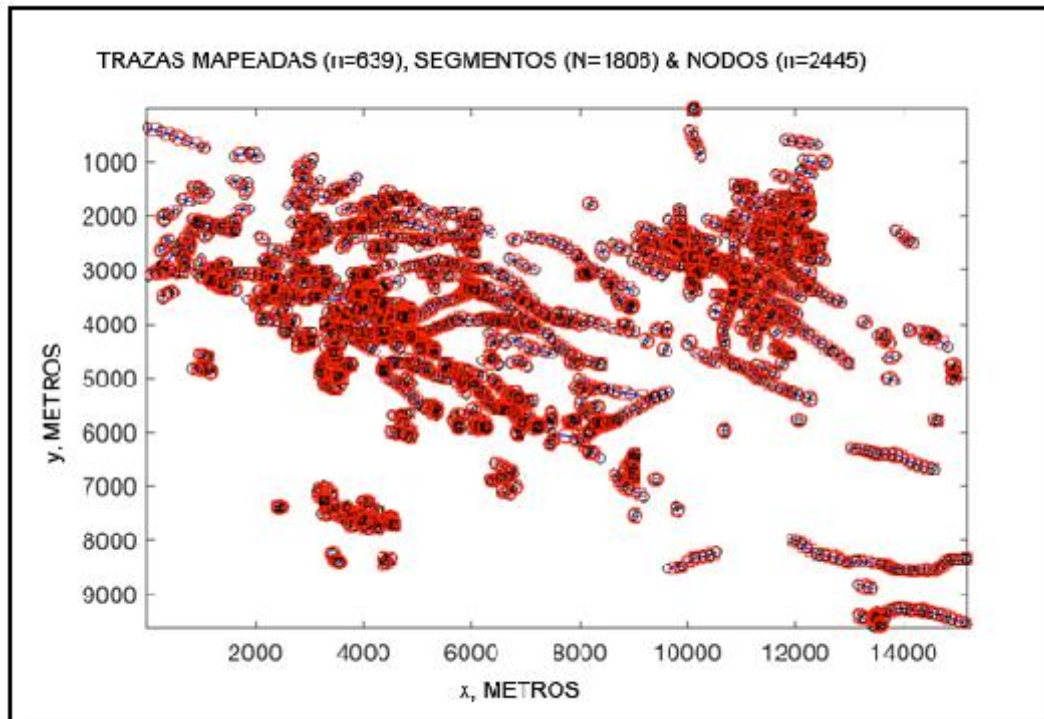


Figura 3. Imagen mostrando las líneas que corresponden a las fracturas en el mapa de Geyne [1] en la dimensión real de longitudes. Los círculos rojos indican los nodos entre las líneas y poli-líneas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez generados los archivos delimitados por tabulador, se ejecutaron los programas de la colección para generar, primeramente, el gráfico de orientaciones. Para ello, se obtuvo un diagrama tipo de “rosa de los vientos” (figura 4). El resultado mostrado en este diagrama, confirma la presencia de una población de fracturas como una función de la abundancia de orientaciones (intervalo de clase = 005°) en la totalidad del área de cobertura del mapa.

Mediante la inspección visual, se puede determinar que el resultado indica que las fallas en la Sierra de Pachuca tienen una orientación preferencial NW-SE, el resultado del programa indica una dirección de preferencial de 300° . Cabe mencionar que este dato no aporta información nueva. Sin embargo, para los propósitos de este trabajo, sirve como parámetro de verificación y da la certeza de que la colección de programas funciona adecuadamente con los datos de entrada asignados. En la compilación del programa, se ha agregado la opción de declarar la declinación magnética, en este estudio se declararon 7.5 grados hacia el NE que corresponde a la Sierra de Pachuca. Los resultados de fracturas se muestran mediante los mapas de contornos de intensidad y de estimación de la densidad de fracturas (figura 5 y 6, respectivamente). Estos mapas de contornos se realizan a partir de los datos de segmentos de recta (unidades de L^{-1} y L^{-2} , densidades e intensidades, respectivamente) [8]. Los mapas indican valores de intensidad alta en dos zonas: la primera se ubica entre las coordenadas 4000m en la dirección de las ordenadas y en 4000 m en la dirección de las abscisas (figura 5 y 6). En el mapa original, esta zona

corresponde al área comprendida entre la ubicación de la Veta Analcos y Rosario Viejo, en las inmediaciones de la mina El Bordo. La segunda zona se ubica entre las coordenadas 1100 m, 3000 m (coordenadas x e y , respectivamente). En el mapa original, esta zona corresponde a la ubicación del Distrito Minero Real del Monte. En el mapa de contornos de la densidad de fracturas, se observa que la densidad tiene una distribución a lo largo de una dirección NW-SE, lo cual puede ser considerada como las áreas de mayor recarga de agua de lluvia en la Sierra de Pachuca.

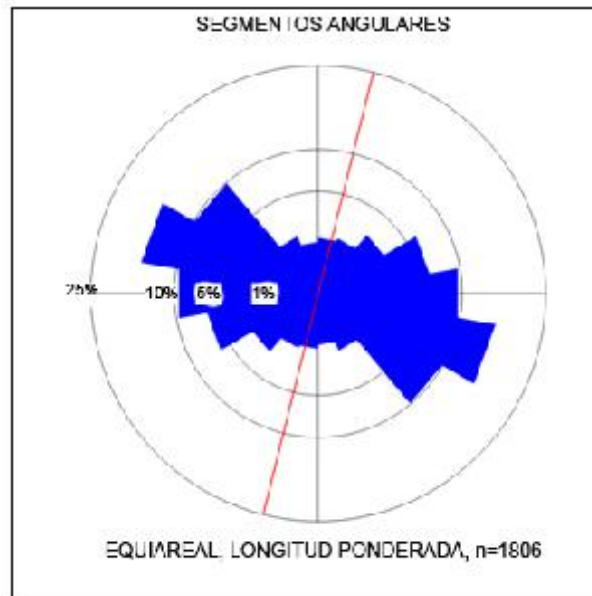


Figura 4. Diagrama de tipo “rosa de los vientos” mostrando la orientación preferencial de las fracturas en la Sierra de Pachuca (300°). La línea roja corresponde a los grados de declinación magnética que se deben compensar en la orientación de los datos estructurales.

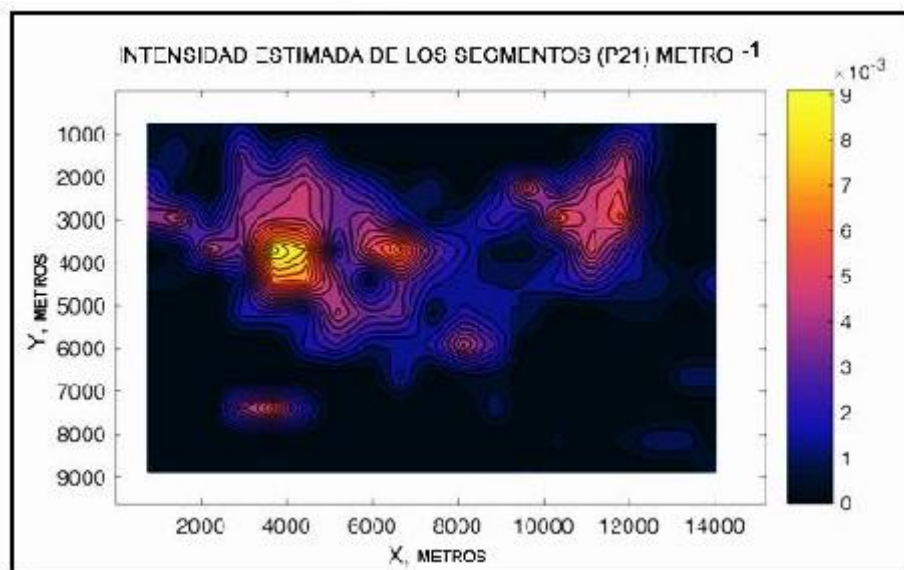


Figura 5. Mapa de contornos indicando las zonas con una mayor intensidad de fracturas. Los máximos valores se concentran en el área donde se localiza la mina El Bordo y en el Distrito Minero Real del Monte, de acuerdo al mapa de Geyne [1].

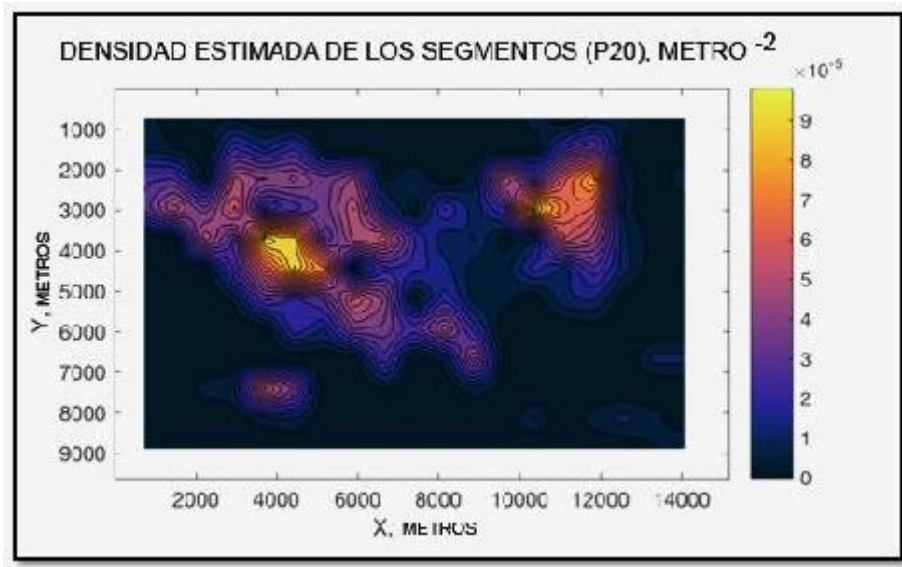


Figura 6. Mapa de contornos indicando las zonas con una mayor densidad de fracturas. La distribución de valores altos define dos máximos que se concentran en las áreas donde se ubica la mina El Bordo, al oeste y en donde se localiza el Distrito Real del Monte, al este.

Finalmente, se tiene el resultado del análisis del tensor de fracturas. El resultado obtenido es una gráfica polar que muestra la distribución direccional del número de fracturas que intersecta la línea de escaneo determinada por los tensores de segundo y cuarto orden. Como se puede observar en la figura 7, los resultados de ambos tensores son similares. Lo que sugiere que, muy probablemente, la etapa de deformación frágil responsable de las fracturas ocurrió bajo un solo episodio de deformación y que, por otro lado, hay una marcada consistencia en los datos [9].

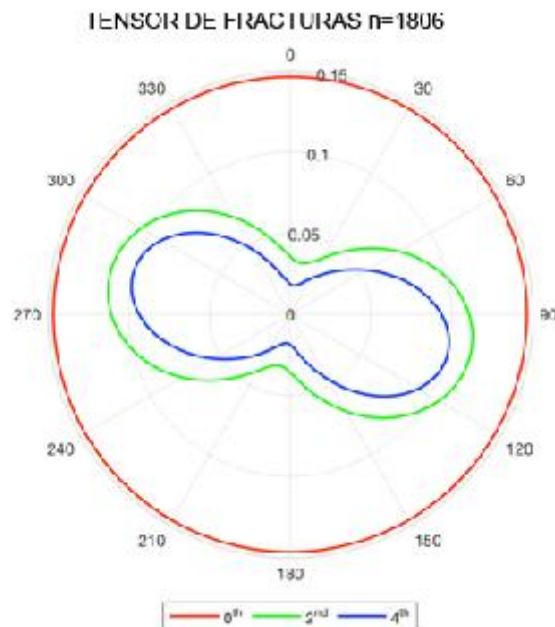


Figura 7. Diagrama polar para ilustrar la dirección del tensor de fracturas, la línea en verde corresponde al tensor de segundo orden y la línea azul al resultado del tensor de cuarto orden.

4. CONCLUSIONES

Los resultados que se han obtenido en el desarrollo del presente trabajo, permiten entender la deformación frágil de la Sierra de Pachuca desde el punto de vista de la geometría euclidiana y la topología. La fundamentación primordial del estudio es la característica bidimensional de un mapa geológico. En consecuencia, el hecho de que las fallas y fracturas en rocas del área de estudio se muestren como segmentos de líneas en el mapa, dan lugar a la aplicación efectiva de la cuantificación de la geometría de los segmentos de línea. Las evaluaciones individuales de las fracturas proporcionan la estimación de las longitudes y orientación de las mismas. Las evaluaciones del entramado o red de fracturas permiten estimar la conectividad y la permeabilidad.

A partir de las evaluaciones individuales, es posible estimar la orientación preferencial de las fallas y fracturas, 300° o N60W.

Por otro lado, los análisis de la red de fracturas permiten las estimaciones de densidad e intensidad de fracturas. Tales estimaciones arrojan resultados que indican la presencia de dos zonas de alta densidad e intensidad de fracturas, los cuales se interpretan como zonas de recarga fluvial en la Sierra de Pachuca y en el subsuelo, como las zonas de concentración de la mineralización. Estas zonas de alta concentración y densidad de fracturas se ubican en la porción norte oeste y otra en la porción norte oriente de la zona de estudio. Las concentraciones altas corresponden a la ubicación de la Mina el Bordo, al occidente y al oriente al Distrito Minero de Real del Monte.

El desarrollo del método abre las vías para evaluar la interconectividad de las fracturas en el área de estudio. Adicionalmente, el método puede ser aplicado en el análisis de diversos ambientes y escalas, como pudieran ser las láminas delgadas para petrografía o las imágenes satelitales de zonas o terrenos de mayores dimensiones, incluso en imágenes como las que se han obtenido de la superficie de Marte.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Dave Haley, de la Universidad de Aberdeen, Reino Unido, por sus comentarios y ayuda en los cambios que se efectuaron a la colección de programas. También se agradece al Comité Organizador del X Encuentro de Investigación del AACTyM por la atención prestada a la presente contribución. Cabe destacar que el desarrollo del trabajo fue posible, en parte, por el apoyo derivado del financiamiento PAI del proyecto UAEH-DI-17-ICBI-CTM-CF-102.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.R. Geyne, C. Jr. Fries, K. Segerstrom, R.F. Black, I.F. Wilson. Geology and Mineral Deposits of the Pachuca-Real del Monte District, State of Hidalgo, Mexico, Publication 5E, Consejo de Recursos Naturales no Renovables, México, D.F., 1963, 220 pp.
- [2] D. Healy, R. E. Rizzo, D. G. Cornwell, N.J.C. Farrell, H. Watkins, N. E., Timms, E. Gómez-Rivas, M. Smith: Journal of Structural Geology, 2017, vol. 95, pp. 1-16.
- [3] W. Gander: Learning Matlab, A Problem-Solving Approach, first edition, Springer, Switzerland, 2015, pp. 43-55.
- [4] D. Hanselman, B. Littlefield: Mastering Matlab 7, 1st edition, Pearson-Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2005, pp 450-520.
- [5] M. Oda: Mechanics of Materials, 1983, vol. 2, No. 2, pp.163-171.
- [6] B. Berkowitz, H. Hadad: Journal of Geophysical Research, 2000, 102(B6), pp. 12,205-12,218.
- [7] N. E. Odling: Pure and Applied Geophysics, 1992, vol. 138, No. 1, pp. 95-115.
- [8] C. E. Renshaw: Water Resources Research, 1999, vol. 35, No. 9, pp. 2661-2670.
- [9] M. Mauldon, W. M: Dunne, M. B., Rohrbaugh: Journal of Structural Geology, 2002, vol. 23, No. 2, pp. 247-258.