

## Fractales y Geología, una combinación productiva

Las técnicas de análisis fractal ayudan a entender las redes de fracturas de los macizos rocosos y las microestructuras de los minerales

Dado que la prospección en busca de yacimientos minerales filonianos resulta difícil y costosa por su errática distribución, contar con un método científico para localizarlos con más acierto supondría una gran ayuda. Este fue el planteamiento básico que en 1987 llevó a Pablo Gumiel, geólogo del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), junto a otros colegas, a aplicar la Geometría fractal al estudio de los aparentemente caóticos sistemas de filones para poder diferenciar los ricos en mineral de los estériles. Desde aquella innovadora idea hasta ahora, el investigador ha consolidado un grupo que aplica técnicas de fractales a otras áreas de la Geología, especialmente a microestructuras y redes de fracturas.



Pablo Gumiel Martínez

Patricia Serrano Antolín

La actividad investigadora de Pablo Gumiel comenzó en el IGME en 1976, con su participación en diversas campañas de exploración minera para la búsqueda de mineralizaciones de estaño, wolframio, antimonio, plomo-zinc, y oro en varias Reservas del Estado en Extremadura. Gumiel cuenta que, desde la División de Minería de entonces, hoy Unidad de Recursos Minerales, Riesgos Geológicos y Geoambiente, se encargó de la zona de Extremadura y que con el tiempo, ésta se ha convertido en su área de trabajo habitual. De hecho fue mientras desarrollaba un proyecto allí cuando nació la idea “pionera” de aplicar técnicas de análisis fractal al estudio de yacimientos filonianos.

En 1987, en colaboración con la Universidad de Southampton, el equipo del IGME dirigido por Gumiel, llevaba a cabo una investigación en la zona de la Codosera, en Badajoz, sobre métodos de exploración minera de cara a valorar los yacimientos de oro y otros metales preciosos en la zona. Era la época en que comenzaba la crisis de la minería, con la entrada en el mercado de nuevos competidores, que distribuían minerales a precios muy bajos, y con la paulatina sustitución de éstos por nuevos materiales.

El geólogo recuerda como “una tarde hablaba con el profesor D.J. Sanderson, de la Universidad de Southampton y con R. Campos, miembro del equipo y que actualmente trabaja en el CIEMAT, sobre lo costosa que era la investigación con sondeos – un metro de sondeo podía suponer unas 10.000 pesetas de las antiguas- y comentábamos que se necesitaría de algún método para hacerla más productiva en ese marco cada vez más competitivo”.

La dificultad que hace que las prospecciones orientadas a encontrar yacimientos filonianos no sean siempre fructíferas es la distribución errática de algunos minerales, como es el caso del oro. “Se hace un sondeo en un punto, por ejemplo en unas venas de cuarzo, y se encuentra mineral, pero se hace a dos metros, en otras venas de cuarzo, y ahí no se encuentra, cuando estructuralmente los dos conjuntos de venas parecen iguales”.

Mediante el análisis de los datos de unas 11.000 venas, se observó que los sistemas de fracturas se podían caracterizar a través de dimensiones fractales

Para enfrentarse a esa aleatoriedad natural de una manera más exitosa, el geólogo español y su colega inglés se plantearon que “había que encontrar algún criterio aplicable y fácil de utilizar con el que poder discriminar entre los filones ricos en mineral y los estériles”. Y para ello, se les ocurrió seguir las ideas de Benoit B. Mandelbrot, “padre de la Geometría fractal”, quien trasladó a modelos matemáticos formas y procesos de la naturaleza que se consideraban irregulares. En aquellos años, los fractales se empezaban a aplicar en investigaciones en otras ramas del conocimiento por ejemplo, en Física o Biología, pero nadie lo había hecho aplicado a la exploración de yacimientos minerales. Gumiel y Sanderson decidieron probarlo en el área de la prospección minera y el resultado fue muy prometedor.



Red de fracturas

### Estudiar las fracturas

Las concentraciones minerales en forma de filones son el resultado de la circulación de un paleofluido mineralizador a través de un entramado de fracturas en una determinada zona de la corteza terrestre.

Esas fisuras de un macizo rocoso, producidas por la constante deformación de las rocas de la corteza terrestre que provocan los movimientos tectónicos, crecen y se conectan hasta producir la percolación que puede dar a la concentración mineral de interés. Según explica Gumiel, en un primer estadio las fracturas son muy pequeñas y están desconectadas, pero según va incrementándose la deformación, tienden a hacerse más largas, anchas y profundas, “dando lugar a las trampas estructurales en las que se produce la percolación del fluido y favorablemente puede formarse una concentración mineral”.

Con el objetivo de entender cómo se producían esas fracturas, y qué diferenciaba a las que albergaban mineral de las que no, los investigadores empezaron estudiando los filones mineralizados en oro, “que hoy día ha pasado a ser prácticamente el único mineral con interés de cara a la prospección”, añade el investigador.

Uno de los procedimientos para caracterizar la geometría de los objetos fractales, en este caso, de las redes de fracturas, consiste en atribuir a cada grupo de objetos una cantidad numérica, que coincide aproximadamente con la dimensión fractal. Una forma de obtener esa cantidad, que es una aproximación a la cuantificación de la organización geométrica del conjunto de objetos que se va a estudiar, es utilizando una serie de parámetros característicos de ese conjunto.

En el caso de las redes de fracturas y venas, la forma de operar, “relativamente sencilla”, consistía en realizar mediciones de parámetros, como la anchura y la longitud de cada vena, el espaciado entre fisuras y los puntos de intersección de las mismas. Para ello, aprovecharon principalmente afloramientos rocosos, además de recabar numerosos datos de testigos de sondeos de los realizados en las campañas de exploración llevadas a cabo por el IGME. La fase de toma de datos transcurrió a lo largo de aproximadamente tres años, en los que consiguieron medir alrededor de 11.000 venas.

Y fue el análisis de toda esa información mediante las técnicas fractales lo que condujo a las primeras conclusiones: “Observamos que los sistemas de fracturas sí tenían una organización, que se podía cuantificar mediante una determinada

Al estudiar aspectos geométricos de procesos, la Geometría fractal se puede aplicar a otros muchos campos de la Geología, afirma Gumiel

dimensión fractal, es decir, se podían discriminar los grupos mineralizados en oro de los estériles porque presentaban dimensiones fractales distintas”.

Tras estos primeros resultados, que se publicaron en un artículo en la revista científica *Economic Geology* en 1991, Gumiel decidió que “tenía que implicar más al IGME” en esta línea, y para ello, impulsó, bien como investigador principal bien como colaborador, una serie de proyectos para profundizar en el conocimiento de la Geometría de las redes de fracturas desde la perspectiva fractal. En ellos, continuó trabajando con los investigadores ingleses a la par que aumentaba el grupo y los colaboradores en España.

“Vamos obteniendo proyectos, principalmente subvencionados por la DGICYT, de poca cuantía pero que nos permiten ir avanzando en la línea”. Así, han conseguido investigar sistemas de fracturas en muy diversos tipos de rocas y filones mineralizados de diferentes elementos, como el oro, el wolframio o el estaño. Por ejemplo, se aplicó con éxito para avanzar en el conocimiento de la red de fracturas y filones de la mina de wolframio (scheelita) de La Parrilla (Cáceres) que es la más rica de Europa en su género. Han realizado pruebas en distintas zonas del Macizo Hespérico y de la Faja Pirítica, en España, en la isla de Livingston, en la Antártida - donde Gumiel estuvo en la campaña de 1999-, en la Patagonia y Río Negro, en Argentina y en la zona de Cornualles, en Inglaterra.

“En todas las organizaciones geométricas de tipo filoniano estudiadas, y han sido muchas, hemos observado que las trampas estructurales, el conjunto de fracturas que el fluido busca, presenta siempre características semejantes de percolación, y dimensiones fractales del mismo orden de magnitud. Que la mineralización filoniana sea de oro, estaño o wolframio dependerá de otros factores como los físico-químicos o los termodinámicos, pero no de los estructurales”.

Veamos un ejemplo a partir de un programa informático que simula la generación de fracturas en un macizo rocoso, desarrollado por el equipo de Gumiel (R.Hernández del IGME). El programa simula longitudes, anchuras, conexiones de fracturas y demás parámetros de esas venas y calcula las dimensiones fractales de cada interacción, desde sistemas no conectados en los que no hay percolación, hasta sistemas bien conectados en los que se produce percolación. Cada etapa se puede caracterizar por una determinada densidad de fractura y por un determinado espectro de dimensiones fractales que son semejantes a muchos patrones naturales de fracturas observados en la naturaleza.

Los datos obtenidos a partir del estudio de muchos sistemas filonianos han servido para profundizar en el conocimiento de las redes de fracturas y los modelos de percolación. Se parte de un conjunto inicial de fracturas aisladas y distribuidas aleatoriamente en un macizo rocoso las cuales tienen una distribución fractal ( $D=1.0$ ). Estas fracturas van creciendo proporcionalmente a su longitud y potencia uniéndose por sus extremos. Cuando el 50% de las fracturas han conectado la distribución pasa a tener una dimensión fractal ( $D=0.8$ ). Finalmente, cuando se conecta el 75% de las fracturas se forma un “grupo de percolación” a una determinada densidad de fractura, (cuya distribución tiene menor dimensión fractal  $D=0.6-0.7$ ); el sistema percola a través de este grupo, el cual favorece el flujo localizado de fluidos y el aumento de la deformación, y si las condiciones físico-

químicas son idóneas se puede producir una determinada concentración mineral. “Y es ahí, casi siempre con esas características geométricas, cuando se produce percolación”, explica el geólogo.

Pablo Gumiel, que habla de su trabajo y de Geología en general apasionadamente, apunta las implicaciones que esta nueva metodología de análisis puede tener. “Es fácil ver el avance que supone disponer de un método que, cuantificando una serie de parámetros, permita averiguar si un macizo rocoso fracturado puede ser susceptible, dependiendo de las condiciones físico-químicas, de albergar mineralización o no, abaratando en cierta medida los costes que conlleva la exploración de yacimientos minerales”. Así, aunque se trata de una técnica teórica en el marco de la investigación básica, “encaja perfectamente en I+D+i porque las empresas pueden beneficiarse de ella en un futuro”.

### **Otras aplicaciones**

A medida que la investigación en redes de fracturas y yacimientos filonianos iba avanzando, se generaban nuevas líneas y grupos de investigación, porque “el estudio de los fractales sirve para abordar aspectos geométricos de procesos, y de ahí se derivan muchos temas relacionados con la Geología”. Entre otros, es aplicable en sedimentología, estratigrafía, tectónica, crecimiento de cristales, karstificación, sismicidad o microestructuras.

El actual grupo de investigación, de carácter multidisciplinar (compuesto por geólogos, matemáticos, geofísicos e ingenieros informáticos), se centra en dos áreas específicas: la aplicación de los fractales al análisis de los diferentes aspectos relacionados con los terremotos y el estudio de microestructuras, concretamente, del maclado de calcita y sus implicaciones en los procesos de deformación.

Estudiar sismicidad desde esta perspectiva “es algo lógico porque no se pueden separar las fracturas de los terremotos”. Esta línea se orienta a la búsqueda de relaciones entre la distribución espacial de terremotos en los bordes de placas y su relación con los tensores de esfuerzo existentes en esas zonas. En ella, el grupo de Gumiel colabora con el equipo de investigación ENCADENA, liderado por el Prof. C. Paredes, del Departamento de Matemática Aplicada de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid.

El proyecto de aplicación de fractales a las maclas (complejos cristalinos formados en el crecimiento simultáneo y entrecruzado de dos o más cristales) se sustenta en una de las propiedades de la Geometría fractal, la invarianza a cambio de escala. Cuando se deforman las rocas y se comprimen, se producen fracturas, a un nivel macroscópico, y maclas, a una escala microscópica.

El objetivo es, a grandes rasgos, “averiguar si el maclado mecánico de la calcita cumple también las propiedades de escalado fractal”. Para ello, están analizando, bajo la dirección del Prof. J.M. González-Casado, de la Universidad Autónoma de Madrid, las maclas de muchas venas de carbonatos en distintas zonas. Con esta línea, añade el investigador, “estamos completando el análisis de la deformación a todas las escalas y comprobando que todas ellas obedecen leyes fractales”.

“Se persiguen tres objetivos: aportar nuevos datos para establecer las relaciones

entre el tensor de deformación de una roca, calculado mediante las maclas y otros métodos que reflejen la deformación total; calibrar paleopiezómetros basados en la densidad de maclas, que permitan establecer la magnitud de los esfuerzos asociados con la formación de las estructuras tectónicas, utilizando para ello una aproximación novedosa como es el análisis fractal; y, por último, establecer el grado de equivalencia entre los estudios de las maclas en microvenas y en su roca caja con el objeto de ampliar las posibilidades de aplicación de estas técnicas”.

Y la deformación no es más que uno de los múltiples procesos geológicos que se pueden analizar desde este tipo de modelos matemáticos. Parece entonces, que aquella tarde en que Gumiel y colaboradores concibieron la idea de aplicar técnicas de Geometría fractal al estudio de yacimientos filonianos, no dieron sólo con un buen método para discriminar filones mineralizados de estériles, sino que abrieron todo un nuevo campo de investigación en Geología en nuestro país.

## Al margen de los fractales

Pablo Gumiel Martínez tiene, junto a su evidente vocación investigadora, un enorme interés hacia la divulgación científica y la enseñanza. Y para “llenar esa parte” de él, imparte clases como Prof. Asociado en la Universidad de Alcalá y está también implicado en las líneas de investigación de Patrimonio geológico – Geología de los Espacios Protegidos- y Cartografía temática ambiental.

La misión de la primera es divulgar el conocimiento geológico, “acercar la Geología a la gente”, al mismo tiempo que reivindicar la importancia de la Geología en los procesos bióticos. “No se puede desligar el medio físico, es decir la roca, del suelo, de la vegetación y la fauna, porque dependiendo de ésta, se tiene un determinado tipo de suelo, y dependiendo del suelo una vegetación específica, y según ésta, los animales de un determinado hábitat o ecosistema”.

Desde este planteamiento, Gumiel propuso a la Junta de Extremadura la creación de una guía geológica del Parque Natural de Monfragüe, (recientemente declarado Reserva de la Biosfera por la UNESCO) proyecto que le concedieron y que ha resultado en la publicación de la citada guía el año pasado. Es el primer libro de estas características que se edita en España, y “está teniendo mucho éxito”, añade. También ha elaborado un documento con la Comunidad de Madrid sobre la influencia del medio físico en la definición de un espacio protegido. “Es muy importante hacer ver que todos los procesos están interconectados, que todo es un conjunto”.

Sobre la línea de Cartografía temática ambiental, el prolífico geólogo explica que consiste en “unir la geología con los recursos naturales. Los recursos naturales y los minerales en particular tienen que ser estudiados dentro de su contexto geológico”. Con este proyecto, se generan Mapas derivados o de “segunda generación”, en los que los recursos minerales se añaden a la base de los mapas geológicos. De esta forma, los yacimientos minerales se contemplan como “parte de un proceso geológico global que sin duda ayuda a entender su localización y proceso genético”.

**FICHA TÉCNICA**

Grupo de Investigación de Fractales Aplicados a la Geología –GIFAG

**Centros:** IGME, CIEMAT, ETS Ingenieros de Minas (UPM) y UAM

**Coordinador:** Pablo Gumiel Martínez

**Dirección:** c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid

**Teléfono:** 91 349 57 90

**Fax:** 91 349 58 34

**Email:** p.gumiel@igme.es

**Líneas de investigación:** Aplicación de los fractales al estudio de la geometría de las redes de fractura y de los yacimientos minerales de tipo filoniano; Aplicación de los fractales al estudio de microestructuras: maclado de calcita y sus implicaciones en los procesos de deformación; Aplicación de los fractales al estudio de la distribución de la sismicidad en zonas de límites de placas tectónicas.