Fractales, su importancia en geología. Simulación de patrones fractales naturales

Fractals, Their importance in geology. Simulation of fractal natural patterns

P. Gumiel Martinez

(ITGE) Rios Rosas 23, 28003, Madrid

ABSTRACT

An introduction to the Symposium 16 on Fractals and Geology is presented in this contribution. A summary on fractal concepts and natural geometrical fractal patterns are showed. Finally, computational simulations of natural geological structures are performed, using techniques of Iterated Function Systems (IFS of Barnsley, 1988).

Key words: *Fractals, Geology, Simulations, Geometry, Natural patterns, IFS*

Geogaceta, 20 (1996, 1382-1384
ISSN:0213683X

A menos de una década del siglo XXI nos dirigimos, casi de forma inexorable, a un mundo complejo en todas sus acepciones. Esa complejidad, al mismo tiempo enriquecedora, se manifiesta en unas nuevas relaciones sociales, políticas y económicas complejas, que tendran necesariamente que contemplarse en marcos globales. En este contexto, cualquier acontecimiento, proceso o decisión puede llegar a tener repercusiones difícilmente predecibles y por consiguiente presentar un comportamiento caótico, en el que variaciones infinitesimales en las condiciones iniciales pueden llegar a producir grandes diferencias en los resultados obtenidos. Mientras tanto, el papel de la Ciencia es tratar de buscar esas soluciones, que en definitiva hagan que el Hombre sepa como vivir y desarrollarse dentro de esa complejidad.

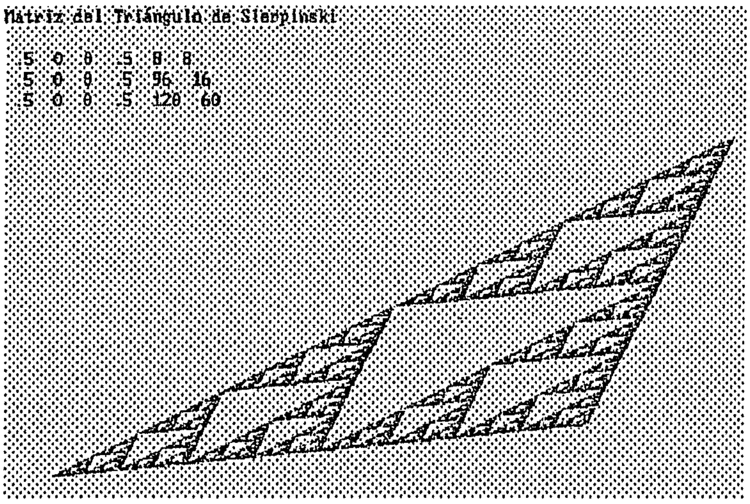
Introducidos, casi por lógica evolutiva, en los conceptos de sistemas complejos y caos determinista, asistimos a la transición de los fenómenos lineales a los no lineales, afrontando una nueva época con un nuevo paradigma que conecta más a la Ciencia con el Hombre y la Naturaleza. Entre el dominio del caos incontrolado y el orden euclídeo, hay una zona de orden fractal, como puso de manifiesto Mandelbrot a principios de los años sesenta. ¿ Cómo explicar la forma del relieve topográfico, la geometría de las fracturas y su distribución, la morfología de los sistemas fluviales y la aparición de concentraciones minerales, o yacimientos de petróleo, mediante la geometría clásica ?. ¿ Cómo justificar en el futuro, que ya es casi presente, la existencia de compartimentos estancos en la Ciencia?. La primera cuestión se responde diciendo que es necesario recurrir a la geometría fractal, lo que se aborda en esta contribución mediante la presentación de una serie de experiencias, que comprenden desde patrones naturales cuya geometría es claramente fractal, a simulaciones numéricas de medios naturales obtenidas por técnicas computacionales. La segunda cuestión se responde de inmediato: la Ciencia en compartimentos aislados no tiene justificación. Estamos ante una transdisciplinariedad manifiesta de las diferentes disciplinas, de la cual todas las ramas del conocimiento obtendrán beneficios mútuos. Por ejemplo, la Geología necesita del concurso de la Física, la Química y las Matemáticas, hecho que se pone claramente de manifiesto, a partir del simple análisis geométrico de la mayoría de los patrones naturales, que son sistemas complejos constituídos por muchos elementos que interaccionan entre sí.

A partir de los descubrimientos de Mandelbrot sobre la organización fractal de la Naturaleza, alejándose de la geometría clásica euclidiana, estos conceptos comenzaron a aplicarse en otras ramas del conocimiento. La naturaleza de los fractales queda reflejada en el propio significado de su nombre ; fractal, del latín "fractus" (irregular o fragmentado), y se aplica a aquellos objetos que tienen una forma sumamante irregular o interrumpida. En Geología, estos conceptos se empezaron a utilizar, principalmente en los campos de Geomorfología y Sismología, cuando en la zona de la Falla de San Andrés en California, se descubrió que los sismos de magnitud 6 o menor tenían una distribución fractal en el espacio y en el tiempo, al comprobar que los temblores se presentaban en grupos autosemejantes y no en intervalos regulares. Por otra parte, Turcotte (1986) comprobó que las relaciones tonelaje - ley de algunos yacimientos de Hg, Cu y U de Estados Unidos presentaban también distribuciones fractales.

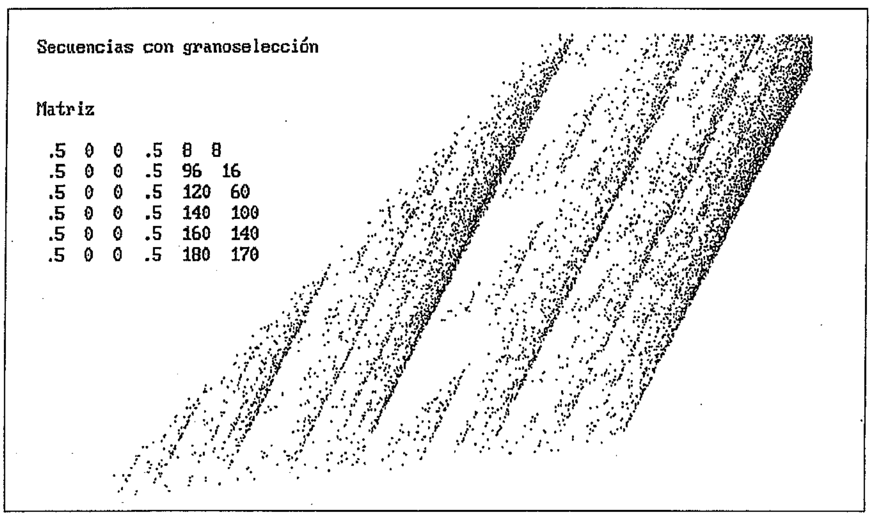
Aunque, a veces, resulta difícil el entendimiento debido a lenguajes específicos de cada disciplina, y a la subjetividad en las observaciones de los hechos, hay que extraer la parte positiva de esa diversidad. Es fascinante observar las analogías geométricas entre diferentes patrones, y de gran utilidad si se saben obtener las consecuencias que puedan derivarse de las mismas. Por ejemplo, la geometría de unos filones ramificados es un claro ejemplo de geometría fractal y puede ser muy similar a la disposición de arterias y venas en algunas partes del cuerpo humano. Igualmente, es sugerente que la geometría de los agujeros redondos aleatorios de lonchas de "queso de Appenzell", (- con dimensiones fractales de 1.90 y 1.75, Mandelbrot, 1982 -) sea comparable a la distribución de cráteres lunares, o a la de fragmentos redondeados de una brecha de origen sedimentario, tectónico o volcánico. Es notable que procesos tan diferentes genéticamente puedan dar lugar a patrones geométricos fractales y que puedan ser tan similares.

Si observamos la distribución irregular y caótica de una red de venas mineralizadas, lo que se denomina en términos geológico-mineros "stockwork", de gran importancia minera por sus leyes minerales, la geometría irregular de las venas recuerda bastante al trazado de un vuelo de Lévy en el espacio. En definitiva, se trata de una red de fracturas que ha percolado, favoreciendo el drenaje de los fluidos mineralizados. Un ejemplo de gran interés en España es el stockwork con sulfuros de Cerro Colorado, en las Minas de Rio Tinto, Huelva.

Por otra parte, si analizamos la distribución geométrica de las nerviaciones de una hoja palminervia o penninervia, ésta recuer-



a) Triángulo de Sierpinski



b) Simulación de secuencias cíclicas con granoselección (Gumiel, 1993)
(Simulaciones con 20.000 puntos en cada caso)

c) Secuencias cíclicas con granoselección. Conglomerado aurífero de Witwatersrand (Sudáfrica)

Fig. 1.- Simulación de Patrones fractales naturales

Fig. 1.- Simulation of natural fractal patterns

da bastante a la expresión geométrica de una red hidrográfica de un sistema fluvial de tipo braided, o a la disposición de coladas en un cono volcánico, siendo todos ejemplos de geometrías fractales. Sus ramificaciones, de compleja configuración, son ejemplos naturales de "bifurcaciones" de cualquier mapa que represente caos determinístico. Igualmente, la morfología de las lavas cordadas, o la distribución de precipitados minerales en cualquier cueva natural o antrópica da lugar a bellas formas fractales.

En todos los análogos naturales a los que se ha hecho referencia, se ha utilizado intuitivamente el concepto de escalado. Una de las percepciones físicas claves en la definición conceptual de un fractal, es que todo proceso u objeto muestra características semejantes a diferentes escalas, por consiguiente, es invariante al cambio de escala. Muchos fenómenos naturales son fractales y una consecuencia importante de dicha fractalidad, es que se puede obtener información a una determinada escala que sea de interés para otra. Generalmente, tales propiedades siguen distribuciones hiperbólicas, donde la propiedad (P) está relacionada con el tamaño (t) mediante la ecuación $P = C\,t^{-D}$, y el exponente D, es frecuentemente la dimensión fractal del sistema, la cual se obtiene de la ecuación anterior utilizando logaritmos,

$P = C\,t^{-D}$

$\log P = \log C - D \log t$, y por lo tanto

$D = (\log P - \log C) / \log(1/t)$

Dimensión fractal (D), en sentido genérico, es un número que sirve para cuantificar el grado de irregularidad y fragmentación de un conjunto geométrico, o de un objeto u objetos naturales.

Los fractales se basan en el concepto de autosemejanza, una propiedad que presentan aquellos sistemas cuyas estructuras permanecen constantes al variar la escala de observación; en otras palabras, cuando "las partes", por pequeñas que éstas sean, se parecen al "todo". Estos son los fractales autosemejantes. En la Naturaleza son más frecuentes los fractales autoafines, que son aquellos en los que el objeto es parecido a diferentes escalas, pero no como un "calco".

En Geología, todo estudiante de los primeros cursos es iniciado en la importancia de la escala, de aquí que sepa que una fotografía de la Naturaleza debe ser escalada con cualquier objeto que sirva de referencia (una moneda, el clásico martillo de geólogo, una persona etc.). Si no es así, es imposible determinar si la fotografía cubre 10cm o 10 km. Un ejemplo práctico de gran interés geológico y metalogénico es la red de percolación que constituyen las fracturas, es decir los filones mineralizados en scheelita de la Mina de La Parrilla en Cáceres.

La cartografía de detalle de las trazas de fracturas que se encuentran en un área determinada, es una muestra aleatoria de la red de fracturación de la Mina y es invariante al cambio de escala. Por consiguiente, cualquier zona seleccionada al azar, a escala microscópica o mesoscópica, es fiel reflejo de la red de fracturación a escala macroscópica (Gumiel *et al.* 1995).

Desde el punto de vista de la prospección, el análisis de la distribución de potencias de venas, en afloramientos y en sondeos, se empezó a utilizar como un método eficaz de discriminación de sistemas filonianos auríferos en algunas zonas del Sinclinal de La Codosera, en Badajoz (Gumiel *et al.* 1992, Sanderson *et al.* 1994), y ahora se ha utilizado para la caracterización geométrica de otros conjuntos filonianos del Macizo Hespérico, en particular para los de la Mina de La Parrilla (Gumiel *et al.* 1996, en este volumen).

Por otra parte, las posibilidades que actualmente ofrece la ciencia computacional, sin duda, van a favorecer el desarrollo de modelos y simulaciones que se aproximen con más rigor a los sistemas naturales. A modo de ejemplo, un algoritmo parecido al que se utiliza en la generación del famoso triángulo de Sierpinski (Fig. 1a), que está basado en el algoritmo del caos determinístico, fué utilizado por Gumiel (1993) para generar una simulación de una secuencia cíclica con granoselección (Fig. 1b), muy frecuente en cualquier proceso natural, desde la sedimentación fluvial (Fig. 1c), a procesos de cristalización en una cámara magmática.

El algoritmo del caos determinístico, que genera el triángulo de Sierpinski, utiliza los Sistemas de Funciones Iteradas (IFS de Barnsley, 1988). En síntesis, una transformación afín W en el plano euclídeo tal que, $W:R^2 \rightarrow R^2$, es aquella que transforma puntos de dicho plano, en otros nuevos dentro del mismo plano, según la ecuación $W(x,y) = (ax+by+e,cx+dy+f)$, en la que a,b,c,d, e y f son números reales. Esta ecuación, en forma matricial, se expresa como sigue:

$$W\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ax+by+e \\ cx+dy+f \end{bmatrix}$$

consistente en una transformación lineal, representada por una matriz de segundo orden $A = \begin{bmatrix} ab \\ cd \end{bmatrix}$, seguida de una traslación especificada por el vector $t = \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix}$, de coordenadas $(e,f) \in R^2$.

Otro ejemplo es la simulación de patrones de fracturación en una masa rocosa, de gran interés por su aplicación a problemas de conectividad y percolación de redes de fractura, en base a sus características geométricas fractales (Gumiel y Hernández 1996, en este volumen).

Como reflexión final, hay que resaltar que los fractales representan una nueva geometría de la Naturaleza, y no solo eso, sino que además suponen una nueva "herramienta" muy útil para abordar problemas geométricos que antes eran impensables. Esto ha abierto la posibilidad de comprender mejor las leyes que gobiernan estos sistemas complejos, y en un futuro, es posible que se puedan incluso llegar a establecer modelos de predicción mas rigurosos de determinados procesos naturales.

Referencias

Barnsley, M.(1988): *Academic Press, Inc.*394p.

Gumiel, P., Sanderson, D.J., Roberts, S. y Campos, R.(1992): *Geogaceta*, 12, 3-7.

Gumiel, P. (1993). *Programa Graded de simulación, mediante SFI.* (inédito).

Gumiel, P., Campos, R. Sanderson, D.J. y Roberts, S. (1995): *Bol.Geol.Min.*106-4,16-37.

Gumiel, P. y Hernández, J.R.(1996.): *IV Congreso Geológico de España,* Alcalá de Henares, 1996.

Gumiel, P., Campos, R., Hernández, J.R. y Paredes, C. (1996) : *IV Congreso Geológico de España,* Alcalá de Henares, 1996.

Mandelbrot, B.B.(1982): *Freeman & Company,* New York,468p.

Sanderson, D.J., Roberts, S. y Gumiel, P. (1994): *Economic Geology*,89,168-173 .

Turcotte, D.L. (1986): *Econ.Geology.* 81, 1528-1532.