

Investigación

Estructuras emergentes y órdenes intermedios: paradigmas para entender la complejidad en la naturaleza... y en la vida

Emerging structures and intermediate orders: paradigms for understanding the complexity in nature ... and in life

Miguel Ángel Martín Martín

Revista de Investigación



Volumen IV, Número 2, pp. 067–074, ISSN 2174-0410

Recepción: 14 Abr'14; Aceptación: 10 Sep'14

1 de octubre de 2014

Resumen

En esta nota se repasan las características más importantes de estructuras complejas que emergen como resultado de procesos dinámicos y se mencionan algunos ejemplos. Se da un ejemplo matemático sencillo que sirve para ilustrar algunos aspectos relevantes sobre la génesis y características de los sistemas complejos.

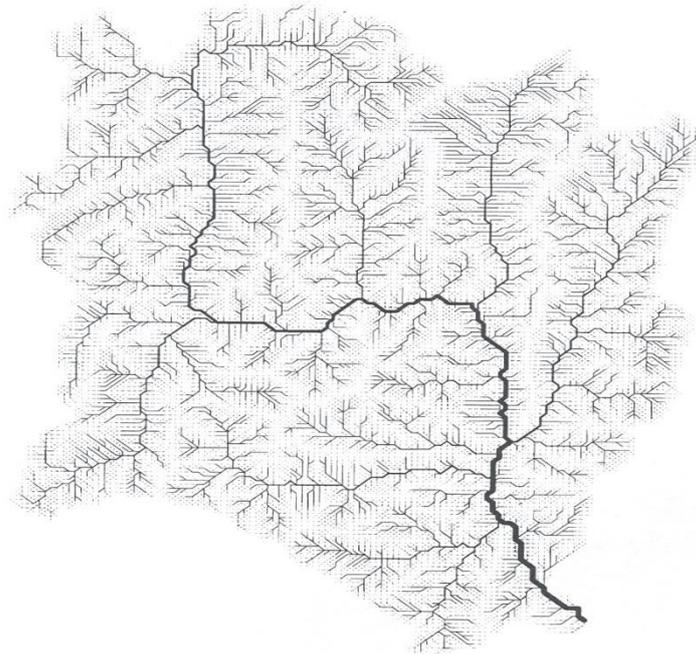
Abstract

The main features of complex structures emerging as a result of dynamical processes are reviewed and some examples of such structures are given. A simple mathematical model is used to illustrate some relevant aspects on the genesis and features of complex systems.

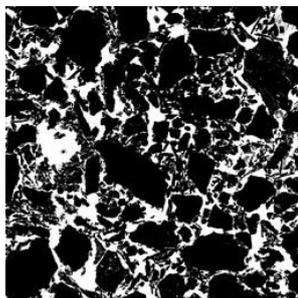
1. Estructuras emergentes “everywhere”

Las estructuras emergentes están por doquier y aparecen como fruto de la evolución de los sistemas.

Un ecosistema, una cuenca de drenaje, el suelo, un hormiguero o la misma mente pueden servir de ejemplos de estructuras emergentes en las cuales de las interacciones locales entre los componentes de una red (nivel micro) emerge una estructura o patrón global (nivel macro).



En el caso de las redes fluviales, por ejemplo, el proceso de ramificación guiado por una mezcla de causas deterministas y componentes aleatorios, determina a largo plazo la estructura de la cuenca de drenaje. Otro proceso, el de fragmentación de sistemas, término que puede tener un sentido muy amplio, está en el origen de la formación de muchos sistemas complejos. Como ejemplo concreto citaremos el suelo como medio granular/poroso formado por individuos (granos y poros), que aparecen como resultado de un largo proceso en el que la fragmentación es un proceso determinante. El resultado es la emergencia de una estructura con características fractales bien definidas.



zoom



El estudio de estas estructuras ha dado lugar a las modernas teorías de la complejidad que involucran un amplio abanico de aspectos que explican la formación y las características de estas estructuras. Aquí pretendemos simplemente mencionar de forma somera alguno de ellos, pero sobre todo, dar un ejemplo matemático, que aunque simple, sirve para ilustrar e intuir aspectos relevantes sobre la génesis y características de los sistemas complejos.

Una explicación de la formación de estas estructuras es la teoría, ampliamente aceptada, de la *criticalidad auto-organizada* (SOC) o tendencia de los sistemas con muchos grados de libertad para construir un estado al borde de la criticalidad que se caracteriza por involucrar un amplio rango de escalas (espaciales o temporales). Una idea esencial de la SOC consiste en admitir que la mano invisible que guía la evolución de los grandes sistemas interactivos debe buscarse en las propiedades generales de la dinámica más que en el estudio detallado de cada uno de sus ingredientes, como tradicionalmente sostienen los reduccionistas.

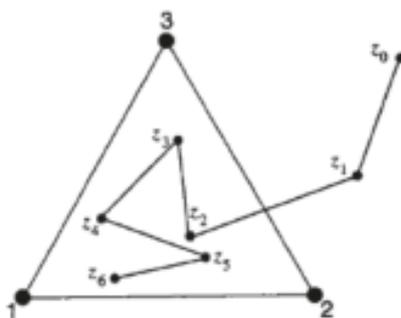
Una característica que suelen compartir esas estructuras emergentes es la *fractalidad* o ausencia de una escala característica unida a una invarianza respecto de la escala, la cual se manifiesta con la aparición de *leyes potenciales* para las distribuciones de probabilidad de distintas características geométricas. Ello puede explicarse a su vez por el hecho de que muchos sistemas de la naturaleza evolucionan una forma intermitente y con rupturas, más que de una forma suave y continua, en las que interviene el azar provocando acontecimientos y formas de todos los tamaños.

Otra característica fundamental es el nivel intermedio de *complejidad* o *incertidumbre* inherente al sistema, lo que se mide por la *entropía de Shanon* que en tiene su lectura en términos de *heterogeneidad* o de *diversidad*. En dicho nivel intermedio radica la estabilidad de este tipo de estructuras. Una estructura (por ejemplo, comunidad de individuos) poco diversa o heterogénea, es muy vulnerable, mientras que con una diversidad extrema (por ejemplo, con muy pocos individuos de cada especie), colapsa. El nivel intermedio garantiza la estabilidad y la adsorción de inestabilidades puntuales.

2. Un ejemplo simple pero paradigmático

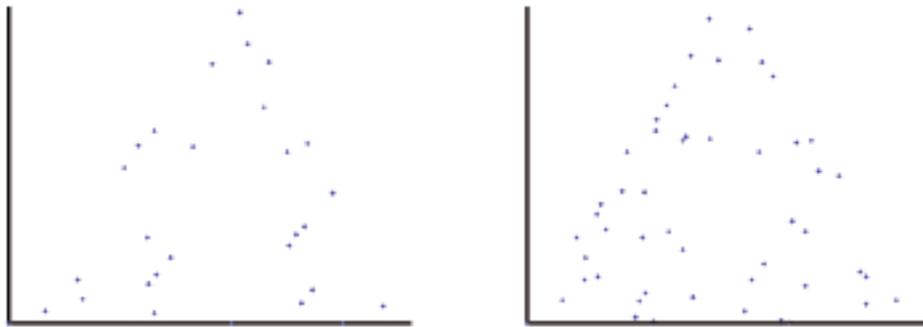
El ejemplo que sigue, denominado “juego del caos” (probablemente conocido por el lector) puede ser muy útil para intuir aspectos importantes de las estructuras complejas y hacer un paralelismo con lo que hemos relatado más arriba.

Consideremos ahora otro ejemplo de ley de evolución o sistema dinámico. Supongamos que marcamos tres puntos A, B, C en el plano y partiendo de un punto x_0 cualquiera nos dirigimos en línea recta hacia uno de dichos puntos quedándonos a mitad de camino entre el punto seleccionado y el punto de partida x_0 .

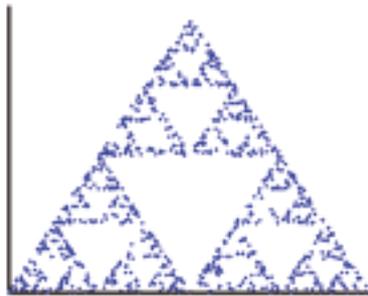


El punto al que hemos de dirigirnos lo seleccionamos de forma aleatoria tirando un dado y con las siguientes reglas: si sale 1 ó 2 nos dirigimos al punto A , si sale 3 ó 4 nos dirigimos al punto B y si sale 5 ó 6 vamos hacia el punto C . Si llamamos x_1 al punto en el que nos hemos quedado una vez hemos tirado el dado y hemos obrado con la norma antes apuntada, repetimos exactamente el mismo proceso una y otra vez obteniendo los puntos o estados $x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ ¿Podría predecirse hacia qué punto o región se dirigen los “futuros” x_n ? ¿Vagarán al azar o existe algún tipo de certidumbre? ¿Dependerán del estado inicial? Puesto que nuevamente se trata de un problema ingenuo que todos podemos entender, parar la lectura de este artículo y pensar en estas preguntas por algún tiempo sería altamente aconsejable. Incluso las personas que conozcan un mínimo de programación, después del ejercicio mental propuesto, pueden mandar a su ordenador que simule lo que ocurriría.

La figura que sigue muestra el resultado de dos simulaciones partiendo del mismo punto, una con 20 iteraciones y otra con 30 iteraciones. Puede verse que los resultados son distintos.



Esta otra figura muestra la simulación con 1000 puntos.



El resultado, aunque sea conocido, es sorprendente: ¡siempre aparece la misma figura! ¡Independientemente del punto del que se parta o de que los primeros resultados sean diferentes! La figura que aparece, llamada triángulo de Sierpinski, es la estructura que emerge como consecuencia de esa dinámica tan simple.

La geometría de este tipo de objetos sigue así una nueva ley de regularidad llamada *autosemejanza* que es la invarianza de su geometría respecto de la escala a la que son observados mostrando huecos (regiones sin puntos) e irregularidades a todas las escalas: si hiciéramos un “zoom” en uno de los triangulitos más pequeños lo que veríamos de nuevo es otro triángulo de Sierpinski. La *dimensión fractal* de esa región, que en este caso es $\log 3 / \log 2$, viene a reflejar su capacidad para rellenar el espacio, indicando que se trata de un objeto geométrico con tamaño intermedio entre una curva y una superficie.

Pero lo que es aún más llamativo es que surjan asociados a procesos dinámicos tan simples como el juego del caos. Allí el objeto no aparece como el resultado de un proceso geométrico “ordenado” como el que acabamos de exponer, pues un trozo de órbita, en el juego del caos, es errática y no manifiesta ninguna regularidad, sino como una estructura *asintótica* (o a largo plazo) que aparece como resultado de una lucha entre determinismo y aleatoriedad presentes en el juego.

Aunque el resultado del juego del caos de una realización concreta $x_0, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, \dots$ (órbita), y el de otra, incluso obtenida partiendo del mismo estado inicial x_0 , puede ser completamente distinto. La evolución de la órbita sigue, de hecho, una dinámica caótica: se tiene una certidumbre acerca de la región del plano en torno a la que vagan las órbitas, que es el mencionado triángulo de Sierpinski, y su dimensión fractal es una primera aproximación de la cuantificación de la incertidumbre del sistema. Aunque es realmente la *dimensión de entropía* $\sum p_i \log p_i$, que tiene en cuenta las probabilidades p_i , la que determina la heterogeneidad con que se distribuyen las órbitas dentro del atractor, y con ello da la medida del *nivel de complejidad* de la estructura emergente.

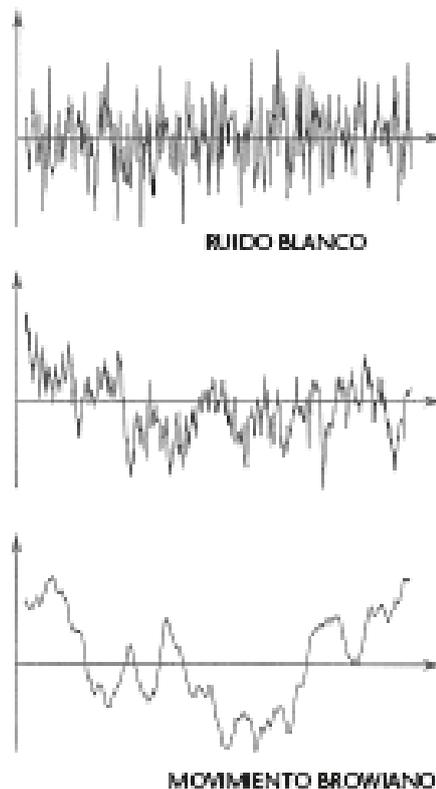
3. Complejidad en la vida y en las ciencias

La complejidad en la naturaleza es más una norma que una excepción manifestándose por medio de estructuras de naturaleza fractal. Este tipo de *orden intermedio* surge bien como fruto de dinámicas caóticas o bien como una necesidad de los sistemas para cumplir una misión o ser estables. Así, por ejemplo, la estructura ramificada (fractal) de los bronquios es la respuesta de la naturaleza a la necesidad de intercambiar el oxígeno en la sangre en plazos pequeños de tiempo, o la complicada estructura tridimensional de los vasos sanguíneos en el hígado responde a la necesidad de optimizar el proceso metabólico.

La irrupción de las nuevas teorías del caos y los fractales han conducido a las nuevas teorías sobre la complejidad que tratan de explicar sistemas tan distintos como el cerebro humano, la organización en un hormiguero o la estructura de los ecosistemas. Estas teorías, si bien de carácter un tanto especulativo, han arrojado una nueva visión sobre la organización de los sistemas en general sugiriendo cómo sistemas aparentemente distintos obedecen a pautas de complejidad muy similares con la omnipresencia de esas estructuras intermedias que

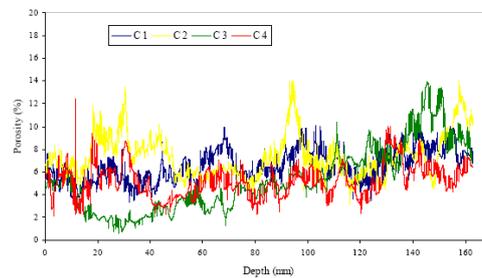
facilitarían el buen funcionamiento evitando que los sistemas colapsen. La cadena de interacciones locales entre los elementos constitutivos del sistema (neuronas, hormigas, elementos vivos de una cadena trófica) que reciben y transmiten información básicamente local a los elementos vecinos, hace emerger una estructura de orden a gran escala. El paralelismo con el juego del caos es grande. Allí el paso de un estado (punto) al siguiente tiene un factor de certeza (se va hacia uno de los tres puntos) y también una “dosis” de incertidumbre. El resultado es la emergencia de la estructura global cuando el número de iteraciones es grande, aun cuando poco puede ser conocido de la sucesión de puntos (órbita) en una secuencia concreta.

Los registros espaciales o temporales derivados de la observación de una estructura compleja, suelen tener una “memoria” intermedia entre el *ruido marrón* (también llamado ruido Browniano) y la ausencia total de memoria del *ruido blanco*.



Los ruidos fractales, en particular el llamado, por razones que no vienen al caso, *ruido $1/f$* , aparecen en innumerables situaciones en la naturaleza, desde la geometría de una costa hasta los ritmos cardiacos, pasando por las secuencias de aminoácidos en el ADN (figuras). En muchos de esos ejemplos las dimensiones fractales toman valores entre 1 y 2 verificándose esa omnipresencia de las estructuras intermedias que parecen ser una constante en la naturaleza.

Así, por ejemplo, la figura siguiente



corresponde a la porosidad observada en secciones transversales de cilindros de suelo cuando se estudian mediante tomografía axial computerizada. La complejidad inherente a los procesos de fragmentación es heredada por la estructura tridimensional porosa del suelo y ésta, a su vez, se manifiesta en medidas indirectas como es la porosidad de las secciones aludidas.

Las estructuras a medio camino entre el orden y el desorden parecen esconder la armonía y la belleza en muchos órdenes de la vida. El dicho “en el punto medio está la virtud” tendría su lectura en los términos en los que venimos hablando: el orden riguroso es aburrido y el desorden absoluto desquizante. Ahora bien, el “punto medio” no tiene un único camino y el equilibrio de ese orden intermedio puede resolverse de infinitas formas. La libertad está permitida, el libertinaje prohibido y las actitudes fundamentalistas desaconsejadas.

2. Conclusiones

Las estructuras emergentes aparecen en innumerables escenarios de la naturaleza como consecuencia de la evolución de los sistemas. Se caracterizan por tener un nivel intermedio de complejidad, aspecto en el que radica su estabilidad. La aparición de estas estructuras puede estar provocada por interacciones locales simples entre elementos del sistema de las que emerge el orden global que las caracteriza.

Referencias

- [1] RODRÍGUEZ-ITURBE, Rinaldo A. *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press, 2001.
- [2] PEITGEN, H.-O., JÜRGENS, H. and SAUPE, D. *Chaos and Fractals. New Frontiers of Science*. Springer-Verlag. New York, 1992.
- [3] MARTÍN, M. A. *Matemáticas Bioenriquecidas*, 2003.
<http://www.matematicasbioenriquecidas.com/>

Sobre el autor:

Nombre: Miguel Ángel Martín Martín

Correo Electrónico: miguelangel.martin@upm.es

Institución: Universidad Politécnica de Madrid

Grupo de Investigación en Fractales y Aplicaciones PEDOFRACT

<http://www.etsia.upm.es/pedofract/>

Dpto. Matemática Aplicada

ETSI Agrónomos