

Descifrando el caos en la naturaleza: fractales, sistemas complejos y fenómenos emergentes



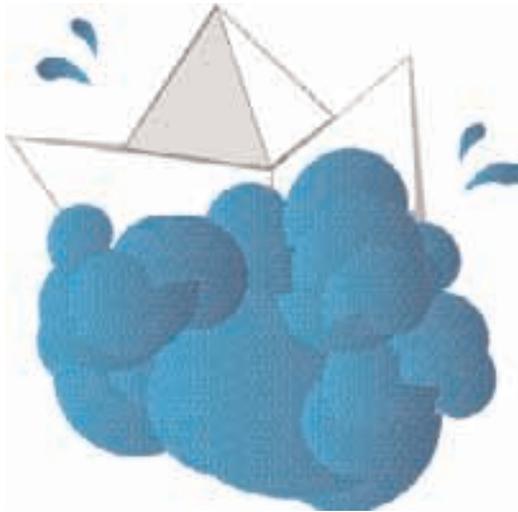
La ciencia hoy ha generado nuevas ideas alrededor de conceptos como caos, estabilidad y autoorganización, a partir de la observación de *sistemas complejos* que existen en la maravillosa diversidad natural que nos rodea.

Ignacio Rozada

Desde la época de Newton hasta hace unos cuarenta años, prácticamente todo aquel que hacía ciencia lo hacía siguiendo un modelo reduccionista. Como modelo reduccionista entiendo la metodología de estudio y ataque de un problema que consiste en desmenuzarlo en sus partes constitutivas para analizarlas individualmente; algo así como divide y vencerás. No se analizaba la dinámica del Sistema Solar sin primero estudiar cómo se mueven los planetas por separado, así como no se estudiaba un ecosistema sin analizar por separado las especies contenidas en él. Esta técnica probó ser extraordinariamente útil en una serie de problemas, y puede decirse sin empacho que cambió radicalmente nuestra visión del mundo.

Los problemas comenzaron con el estudio de los fluidos. En los cuerpos rígidos, basta co-

nocer la posición y velocidad de una partícula para saber cómo se mueve el cuerpo en que se encuentra dicha partícula. En los fluidos, en cambio, no existe la noción de cuerpo, porque cada molécula es, en mayor o menor medida, independiente de sus vecinas. Con todo y eso, se encontró que se podía predecir el comportamiento estadístico de un sistema, siempre y cuando sus partes fueran iguales y las interacciones entre ellas fueran débiles. Ahora piénsese en Júpiter, formado casi enteramente por gases, definitivamente no homogéneo, con temperaturas que fluctúan varios cientos de grados, altas presiones y una atracción gravitacional muy intensa. Ciertamente no es un sistema de gases ideales que pueden ser generalizados estadísticamente. Júpiter, aparte de un montón de lunas, tiene su gran mancha roja, que mide más o menos la distancia de la Tierra a la Luna. Hay reportes sobre la gran mancha roja desde el siglo XVIII. Se trata simplemente de un cúmulo de gases girando en un vórtice, algo así como el remolino de la tina, solo que lleva por lo menos 300 años girando. Resulta sumamente extraño que en un ambiente tan caótico como el de Júpiter exista una estructura libre que permanezca por tan largo tiempo.



Se encontró también que muchas estructuras orgánicas presentaban estructuras fractales

El punto de partida para el estudio de los sistemas complejos (un sistema complejo es aquel compuesto por muchas partes que interactúan entre sí resultando en comportamientos complejos, impredecibles clásicamente) es que en una gran cantidad de sistemas o problemas muy complicados se observan patrones estables en forma de dinámicas periódicas (por ejemplo los monzones en la India).

Uno de tales problemas es el de fluidos turbulentos, que había visto fracasar en su intento por entenderlos a gente de la talla de Werner Heisenberg (fundador de la mecánica cuántica). Resulta que las partículas del fluido recorren con mayor probabilidad un subespacio sumamente complejo, que David Ruelle (Ruelle, 1980) apodó “atractor extraño”. Una luz sobre el problema llegó a fines de los años sesenta y principios de los setenta, cuando empezaron a emerger problemas de caos en los llamados “sistemas deterministas no lineales” y los famosos fractales de Benoit Mandelbrot (Mandelbrot, 1982). Los fractales son estructuras geométricas que tienen estructuras no triviales a todas las escalas, y en general se dice que tienen dimensiones no enteras. Son algo así como las muñecas rusas, las *matrushkas*, que cuando uno las va abriendo siempre encuentra el mismo patrón repetido aunque más pequeño. Se encontró que para sistemas no lineales muy sencillos, que evolucionaban en el tiempo con reglas muy claras (deterministas), las trayectorias para condiciones iniciales muy semejantes divergían exponencialmente. Se puede pensar en un río turbulento en el que tiramos un barquito de papel y después tratamos de tirar otro barquito en el mismo lugar esperando que repita la trayectoria del primero, cosa que no pasará. Todos los sistemas en los que se ven este tipo de cosas son llamados caóticos. Ejemplos clásicos de caos son el clima y la bolsa de valores, pero en realidad prácticamente cualquier sistema realista presenta algún grado de caos.

Analizando la estructura de los atractores extraños se encontró que tenían propiedades fractales, lo cual los ligó al trabajo iniciado por Mandelbrot (Braun, 1993). Se encontró también que muchas estructuras orgánicas presentaban estructuras fractales, como los pliegues de los pulmones o las ramificaciones de las venas y arterias. Al ver una fotografía aérea resulta muy difícil distinguir las escalas, debido a que los mismos patrones se repiten desde hormigueros hasta sistemas montañosos.

Todas estas dinámicas caóticas son generadas en sistemas no lineales. Analizando uno de esos sistemas no lineales, el matemático americano Mitchell Feigenbaum encontró una propiedad común a sistemas que evolucionan en regímenes caóticos: la lla-

mada delta de Feigenbaum (Jensen, 1987). La delta de Feigenbaum (como curiosidad, su valor es 4.669201609102990671853...) aparece en muchos sistemas que evolucionan del orden al caos (por ejemplo los fluidos turbulentos). Pensemos en un río de aguas muy tranquilas en el que introducimos un obstáculo, un palo por ejemplo. En vez de que el agua rodee al palo y continúe en la misma fase ordenada y homogénea anterior al obstáculo, se verá cómo se forman remolinos atrás del palo que se van descomponiendo en más y más remolinos, hasta que de repente ya no se distingue nada aparte de un flujo turbulento de agua. Con ello se encontró que había propiedades que eran comunes a muchos sistemas complejos, y que parte de la dinámica de algunos sistemas complejos evoluciona a partir de reglas universales (Mekler y Cocho, 1998).

En física hace ya algún tiempo que se sabe de la existencia de “puntos críticos” en algunos sistemas, por ejemplo el punto en el cual un material no es ni sólido ni líquido ni gas, o la temperatura a partir de la cual un material magnetizado pierde su magnetización. En el punto crítico, las partículas de un sistema tienen correlaciones a todas las distancias, es decir, cualquier partícula individual tiene la capacidad de afectar la totalidad de su entorno. Se sabía de fenómenos en la naturaleza con esas características, pero era difícil asociarlos con la idea de punto crítico, debido a que casi por definición se trata de un comportamiento muy inestable. La cuestión tomó un nuevo enfoque cuando apareció la teoría de la criticalidad auto-organizada, de Per Bak (Bak, 1996). La idea de Bak era que había mecanismos naturales que provocaban que sistemas que no contaban con un científico que los supervisara, automáticamente se fueran al punto crítico y permanecieran alrededor de él.

El ejemplo clásico es el de una montañita de arena a la que se le va agregando arena poco a poco. La montañita crece a pesar de que de vez en cuando hay pequeñas avalanchas, hasta que alcanza un estado en donde deja de crecer, llamado el punto crítico, y en el que cualquier grano extra en la montaña es capaz de provocar avalanchas que afecten desde unos pocos granos hasta toda la montaña, y de alguna manera toda la montañita es sensible a la caída de los granos. Modelando este sistema en computadoras con autómatas celulares muy sencillos se observan los mismos comportamientos, en términos de avalanchas. La “firma” característica de dicho comportamiento es una relación exponencial entre el tamaño de las avalanchas y sus respectivas frecuencias. El mismo profesor Richter, cuyo nombre lleva la escala con la que se miden los temblores, realizó estudios en los que graficó los temblores en una zona de Ca-

lifornia en función de la intensidad que tenían, y encontró una curva exponencial que sugiere que la corteza terrestre está auto-organizada en el punto crítico. También se sabe que en fenómenos tan dispares como incendios forestales, economía y evolución se encuentran leyes de potencias, y que muchas obras literarias, como por ejemplo el *Ulises* de James Joyce, muestran una ley de potencias al graficar el número de veces que emplea cada palabra, apuntando tal vez a que en el cerebro existen dinámicas similares.

Uno de los temas más bonitos y controvertidos de la teoría de la criticalidad auto-organizada concierne a la evolución de las especies, y en especial a las grandes extinciones. Es conocida por todo mundo la hipótesis de que

En el punto crítico,
las partículas de un sistema
tienen correlaciones
a todas las distancias

los dinosaurios se extinguieron porque un meteorito calibre apocalipsis cayó cerca de Yucatán hace algunos millones de años. Gracias al análisis de restos fósiles se sabe que ha habido varias extinciones masivas, algunas de seres terrestres y otras de organismos marinos. Graficando cada extinción respecto al porcentaje de especies extintas se observa, aproximadamente, una ley de potencias. Bak y compañía sugieren la hipótesis que en esos eventos el ecosistema se encontraba en el punto crítico: todas las especies estaban interrelacionadas, y se pudo haber dado el caso de que un cambio en alguna de ellas provocara una avalancha, que en este caso sería de extinciones. Ergo: no se necesita forzosamente de un meteorito o la

presencia de extraterrestres para explicar por qué no comemos filetes de brontosaurio. Imaginémos un mundo superespecializado donde los humanos sólo comen dingos, que sólo comen canguro, que sólo comen koala, que sólo comen hojas de eucalipto. Si por alguna razón los eucaliptos desarrollan algún tipo de veneno que impida que los koalas los coman, los koalas se extinguirían y habría una cascada de fichas de dominó que culminaría con la extinción del hombre.

La gracia que tienen las dinámicas complejas es que son la causa de la diversidad que tenemos alrededor nuestro. Si todo fuera estadísticamente predecible, como en el caso de los gases ideales, la naturaleza sería una mancha uniforme, en lugar de presentar la diversidad con la que nos maravillamos día a día.

Las dinámicas complejas son la causa de la diversidad que tenemos alrededor nuestro

El que exista caos en las dinámicas complejas puede resultar algo intimidante: normalmente asociamos con caos un absoluto desorden. Sin embargo, como en el caso de Júpiter, sabemos que dinámicas complejas pueden generar patrones estables.

Estas ideas nuevas sobre complejidad y autoorganización han chocado de frente con muchos paradigmas existentes en la biología. Debido al éxito de la teoría de Darwin, y a que no había ninguna otra herramienta disponible, toda la complejidad en la naturaleza era explicada a través de la selección natural. Los patrones y fenómenos colectivos que se dan

en la naturaleza no eran más que pasos en el proceso evolutivo. Una de las corrientes más aceptadas hoy en día en evolución parte del gen: los genes son los que mutan y se reproducen, y la lucha por sobrevivir es una lucha entre genes egoístas cuya meta es reproducirse (Dawkins, 1976), y esa conducta se traslapa al individuo portador. Uno de los puntos polémicos son los fenómenos de cooperación colectiva. ¿Es necesario atribuirle a los genes la habilidad para decidir que trabajando en equipo hay mayores posibilidades de supervivencia? El problema viene cuando se estudian poblaciones con comportamientos colectivos de cooperatividad, por ejemplo las hormigas y las abejas. Resulta casi equivalente intentar explicar a partir de interacciones entre átomos de C, H, O y N los patrones en las cortezas de los árboles. En los dos casos se trata de propiedades emergentes que surgen de sistemas complejos en los que no basta conocer las unidades fundamentales para explicar patrones reconocibles no aleatorios (no es lo mismo agua chapoteada que un remolino).

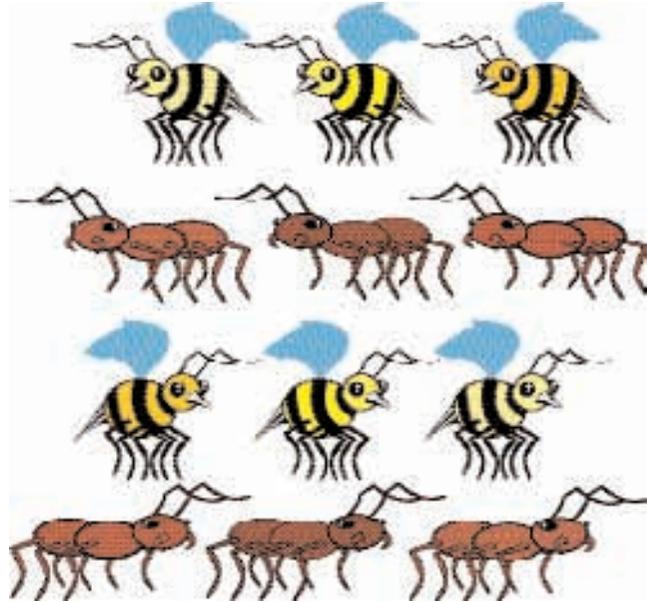
Uno de los patrones colectivos más espectaculares en el reino vegetal es la omnipresente serie de Fibonacci (Ball, 1999). La serie de Fibonacci es la siguiente: los dos primeros números de la serie son cero y uno, y la regla es que el siguiente número de la serie es la suma de los dos anteriores, por lo tanto la serie es: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, etcétera. Si se fija uno en un girasol o en la base de una piña, por ejemplo, notará dos grupos de espirales paralelas que abren a la izquierda y a la derecha respectivamente, y si uno cuenta el número de espirales que abren a la izquierda y el número de espirales que abren a la derecha, inevitablemente se tratará de dos números consecutivos de Fibonacci. Hay estudios que indican que alrededor del 70 por ciento de las plantas están directamente relacionadas con la serie de Fibonacci, y que el restante 30 por ciento está relacionada con series cuasi-Fibonacci. Además, si uno toma un número N muy grande de la serie de Fibonacci y lo divide entre el anterior número de Fibonacci, el resultado será la razón áurea o razón divina, detrás de la cual hay toda una teoría artística desarrollada por los pintores renacentistas, y que originalmente fue descubierta por los griegos como la proporción que debe haber entre dos segmentos tal que sea igual a la proporción entre el segmento más grande y la suma de los dos segmentos.

Uno de los cuadros más famosos de Leonardo da Vinci, el *Hombre vitruviano*, está hecho para demostrar la presencia de la razón áurea en el cuerpo humano. Propone que la razón entre la distancia que hay de la cabeza a la cintura y la distancia en-

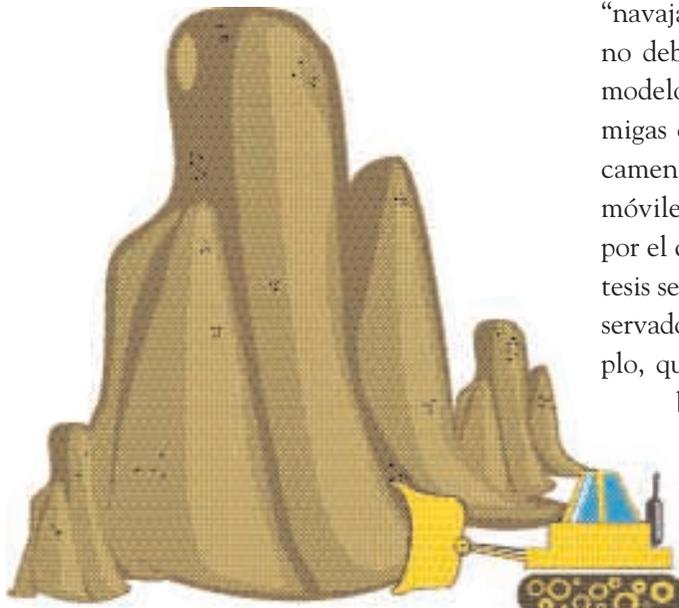
tre la cintura y los pies es la misma que la razón entre la distancia de la cintura a los pies y la longitud de todo el cuerpo.

En la actualidad los fenómenos que originan patrones tipo serie de Fibonacci están bastante estudiados: se conocen como procesos de reacción-difusión, y se pueden observar dinámicamente en algunas reacciones químicas e incluso en enfermedades de la piel. Durante los años veinte del siglo pasado, este tipo de espirales dinámicas fueron descubiertas por un científico ruso de nombre Belousov, pero fueron descartadas por la comunidad científica de su tiempo considerándolas por lo menos absurdas. En otra de sus interpretaciones, la segunda ley de la termodinámica establece que la entropía, el “desorden”, de todo sistema aumenta con el tiempo. Las espirales de Belousov equivalían a sus contemporáneos a echar crema en el café y de repente observar que se forman espirales que se mueven a lo largo de la superficie de la taza chocando unas con otras, una y otra vez en intervalos regulares. No fue sino hasta los sesenta cuando, ya muerto Belousov, el bioquímico Anatoly Zhabotinsky se tomó en serio el trabajo de Belousov y convenció a la comunidad científica de que era un problema real por entender. Hoy la reacción de Belousov-Zhabotinsky está bastante bien entendida: se explican los colores por una especie de competencia entre dos reacciones que están sucediendo al mismo tiempo y que se retroalimentan una a la otra.

El surgimiento en esta época de este nuevo enfoque a problemas viejos se debe en gran medida a la presencia de las computadoras. Precisamente el hecho de que sean sistemas complejos hace imposible en la mayoría de las veces la obtención de soluciones analíticas, por lo que las simulaciones y los experimentos “*in silico*” se han vuelto tan tradicionales como las leyes de Newton. Incluso se habla de una nueva rama de las matemáticas llamada matemática experimental, que hace uso de la alta velocidad de procesamiento de las más rápidas computadoras para obtener soluciones numéricas a ecuaciones que no pueden solucionarse analíticamente. Eso también implica que no tengan la rigurosidad matemática de una solución analítica, y sin embargo los resultados obtenidos han sido asombrosos. Se ha podido explicar con dinámicas caóticas la presencia de la gran mancha roja de Júpiter, que no es otra cosa que remolinos de gas; todos los días vemos en la tele la predicción del clima para el día siguiente; se han modelado hormigas



Incluso se habla de una nueva rama de las matemáticas llamada matemática experimental



El punto de vista del principio llamado de la “navaja de Ockham”, dice que la explicación de un fenómeno debe contener el menor número de hipótesis posible

virtuales, que con base en reglas básicas de interacción, pero moviéndose aleatoriamente, reproducen el comportamiento de las hormigas reales: filas de hormigas en busca de comida, la forma de los hormigueros, patrones de actividad/inactividad; en base a caminantes aleatorios se han modelado procesos de crecimiento de bacterias y patrones como el que se forma cuando se estrella un parabrisas (Miramontes, 2000).

Otra de las ventajas de estos modelos está en que son muy atractivos desde el punto de vista del principio llamado de la “navaja de Ockham”, que dice que la explicación de un fenómeno debe contener el menor número de hipótesis posible. Los modelos con los que se describe el comportamiento de las hormigas con autómatas celulares, por ejemplo, presuponen únicamente que las hormigas se mueven al azar, que se quedan inmóviles después de cierto tiempo, y que se vuelven a activar por el contacto con otras hormigas. Con esas tres simples hipótesis se obtienen resultados asombrosamente parecidos a los observados en colonias de hormigas reales. Se observa, por ejemplo, que la densidad de hormigas se mantiene constante aun bajo perturbaciones (aumentar o disminuir artificialmente las poblaciones).

Con el auge actual de las comunicaciones a través de fibra óptica, hay una serie de modelos basados en ciertas soluciones a ecuaciones no lineales que predicen la presencia de trenes de onda capaces de viajar largas distancias sin descomponerse (llamados *solitones*, y que también son usados para explicar las olas tsunami que han llegado a matar a cientos de personas en Japón). Con ellos se supone que se aumentaría hasta en un orden de magnitud la velocidad de transmisión de datos, además de que se requerirían muchos menos repetidores a lo largo de la línea de fibra óptica.

También en estudios de cerámicas de alta resistencia, usadas en partes de motores, se ha descubierto que la resistencia de la cerámica está directamente relacionada con la dimensión fractal de las fisuras que se forman al interior. En una cerámica de baja resistencia, una fisura producida al interior se va a propagar a lo largo de la pieza de cerámica casi en línea recta, resultando en una fractura en el momento en que atraviese toda la pieza. En cambio, si se consigue que la fisura se propague de la manera más intrincada posible, la resistencia de la pieza aumentará, en el sentido de que las fisuras tardarán mucho más tiempo en llegar al otro extremo. Por lo tanto entre mayor sea la dimensión fractal de las fisuras, mayor será la resistencia de la cerámica.

Todos estos resultados no dejan de ser preliminares, pero apuntan a que hay relaciones a escalas mayores a las que se trabaja normalmente, y que incluso es posible que no sean recuperables reconstruyendo desde abajo. Lo que sí está muy claro es que hay un panorama amplísimo por explorar, que abarca a todas las disciplinas.

La noción de que hay un orden subyacente al aparente caos que presenciamos en el mundo (y no me refiero exclusivamente a la política, sino en general) ha permeado al hombre desde el principio. Que si antes era dios el que se encargaba de todo, que si más bien es como un relojero, que si tal vez nada más se sienta a vernos como en el cine... Quizá la propiedad emergente más importante es la vida. Existe toda una corriente ecológico-filosófica que ve al planeta entero como un sistema complejo, un superorganismo (Lewin, 1996) llamado *Gaia*, del cual todos somos parte (se recomienda no ver la película *Final Fantasy*, en la cual se habla de *Gaia*, y mejor leer las novelas de la serie de *Fundación*, de Isaac Asimov, donde también se habla de *Gaia*, por ahí del cuarto volumen).

A pesar de no tener la firmeza de bases de ramas de la física como la mecánica, es precisamente la increíble variedad de fenómenos que nos rodea la que explica el surgimiento de la ciencia de los sistemas complejos. Para todo aquello que no se mueve en elipses keplerianas, para todo lo que tiene fricción y disipación de energía, en todos los procesos que no son cuasiestáticos, en todo lo que es no lineal, está el campo de trabajo. Puede parecer demasiado amplio, y tal vez lo sea. Philip W. Anderson dijo una vez lo siguiente:

Nosotros los entusiastas de la complejidad (¡olviden la idea de llamarnos científicos de la complejidad!) hablamos, por lo menos en la mayor parte, sobre esquemas específicos experimentables, y sobre mecanismos y conceptos específicos. Ocasionalmente encontramos que nuestros esquemas y conceptos unifican temas, pero si valoramos nuestra integridad, no intentaremos forzar la integración.

La intención de esta cita es recordar que dentro de la complejidad inherente a los seres humanos, hablando en términos *ad hoc*, se encuentra tanto la capacidad de entusiasmarse como la de cometer errores. Me parece que hay una enorme belleza en la teoría de los sistemas complejos por los paralelismos tan asombrosos que se han ido dando, y por la manera en que simplifica y hermana lo que antes era territorio hostil para la ciencia, pero también creo que es inadecuado buscar fractales hasta en la sopa (aunque si es de brócoli tal vez podamos encontrar uno que otro por ahí). Más allá de las preguntas que conteste la teoría de sistemas complejos, son muy importantes las preguntas

Existe toda una corriente
ecológico-filosófica
que ve al planeta entero
como un sistema complejo,
un superorganismo
llamado *Gaia*

nuevas que surjan a partir de ella, y en particular la biología está siendo sacudida hasta sus cimientos, y bastiones que hasta hace pocos años se creían inexpugnables, como la obra de Darwin, están siendo objeto de profunda discusión.

Bibliografía

- Ruelle, D. (1980), "Strange Attractors", *La Recherche*, 108.
 Mandelbrot, B. (1982), *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman.
 Braun, E. (1996), *Caos, fractales y demás cosas raras*, México, Fondo de Cultura Económica, col. "La Ciencia desde México", núm. 150.
 Jensen, R. V. (1987), "Classical Chaos", *American Scientist*, 75.
 Mekler, G. M. y G. Cocho, (1998), "Al borde del Milenio: Caos, Crisis, Complejidad", en *Ciencias de la Materia: Génesis y evolución de sus conceptos fundamentales*.
 Bak, P. (1996), *How Nature Works*, Copernicus.
 Dawkins, R. (1976), *The selfish gene*, Oxford University Press.
 Ball, P. (1999), *The self made Tapestry*, Oxford University Press.
 Miramontes, O. (2000), "Orden y caos en la organización social de las hormigas", *Ciencias*, 59.
 Lewin, R. (1996), "All for one", *New Scientist*, diciembre.

Este trabajo fue realizado durante la estancia de verano del autor dentro del programa "Verano en la Investigación Científica", que ofrece la Academia Mexicana de Ciencias, durante la cual fue asesorado por el doctor Octavio Miramontes, del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Ignacio Rozada Diego Fernández nació en México, D. F. Estudia la carrera de física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Su primer contacto con el trabajo científico fue durante el verano del año 2000, mediante el programa "Jóvenes en la Investigación" de la Dirección General de Divulgación de la Ciencia de la UNAM. Trabajó en el laboratorio de microscopía electrónica del Instituto de Física de la UNAM. Se interesó por el tema de los sistemas complejos asistiendo a la escuela de biomatemáticas que organiza la misma Universidad Nacional.
 gusanobarrenador@yahoo.com