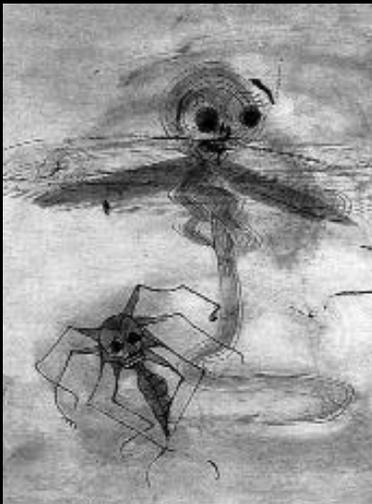


Orden y caos en la organización social de las hormigas

OCTAVIO
MIRAMONTES



La escena se repite una y otra vez en los confines de los bosques, selvas y desiertos del mundo. Desde el interior de la tierra, miles y miles de pies marchan diariamente de las oscuras y húmedas galerías de los nidos hacia los sitios de recolección de alimentos ubicados en la superficie, en ambientes sumamente variables. Las sofisticadas actividades de búsqueda, localización, identificación y captura se realizan de una manera precisa, rápida y, sobre todo, coordinada. En todo este atropellado y bullicioso ir y venir de cientos o miles de individuos, pareciera que no hay lugar para el error o la pereza, para el descanso o la vacilación. Esta aparente explosión de actividad conformó, durante mucho tiempo, la imagen de las hormigas como ejemplos de trabajadoras dedicadas, sacrificadas, tenaces, ordenadas y constantes. Este feliz panorama, deseo y sueño de todo capataz de fábrica o dictador, vino a modificarse después de que en años recientes se realizaron experimentos detallados para observar la actividad de los diminutos individuos en la intimidad de sus nidos.

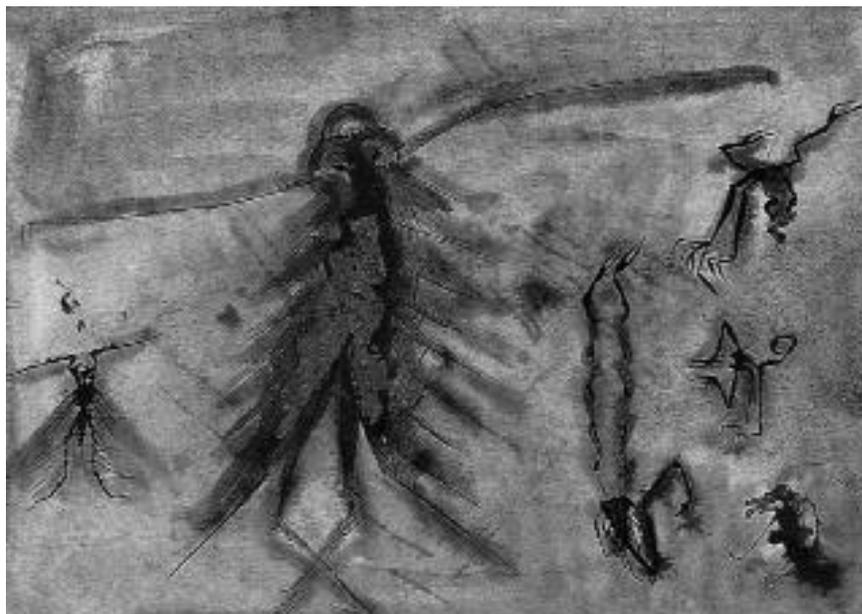
De caos y descansos

Nigel Franks, en Inglaterra, y Blain Cole, en Estados Unidos, encontraron que en ciertas especies de hormigas del género *Leptothorax*, los individuos podían pasar hasta 25% de su tiempo completamente inactivas, en un estado de total reposo. Experimentos posteriores revelaron un curioso patrón en la conducta de los individuos cuando se encuentran en grupos de tamaños distintos. Hormigas aisladas del resto de sus compañeras permanecían una parte importante del tiempo inmóviles y se activaban de vez en cuando de manera espontánea. Por otra parte, en la colonia completa la actividad reveló un patrón sincronizado en forma de oscilaciones periódicas en el que se alternaban estados de reposo e intervalos de actividad, con una alternancia promedio de

entre quince y veinte minutos entre unos y otros. Estos estudios revelaron, además, varios aspectos insospechados de los mecanismos más finos de la interacción social. La activación en individuos aislados ocurría de manera espontánea, pero también sucedía que individuos inactivos que fueran tocados por otras hormigas activas podían activarse. El resultado más importante, sin embargo, fue que la dinámica de las activaciones espontáneas de los individuos aislados mostraba los signos inequívocos del caos determinista. Es decir, la conducta a nivel individual resultó ser caótica (desordenada), mientras que la conducta del colectivo era sincronizada y periódica (ordenada). ¿Y que sucede en el medio de estos dos extremos? Modelos matemáticos simples mostraron una faceta aún más sorprendente de la conducta social de estos insectos: la organización social surge y se mantiene cuando la dinámica de la actividad en la colonia se sitúa entre estos dos extremos, es decir, entre el orden y el desorden; pero antes de entrar en los detalles e implicaciones de esto echemos un vistazo a la vida cotidiana de las hormigas.

Hormigas con temperamento tímido

En 1915 Donisthorpe, uno de los entomólogos británicos más afamados de los siglos XIX y XX, describió a las hormigas del género *Leptothorax* como “ágiles, robustas y resistentes, con un temperamento tímido y adaptable”. El lector estará de acuerdo en que una descripción de este tipo no resulta totalmente aceptable hoy día, debido a que no se debe transferir a un patrón de conducta animal aquellas características propias de los humanos; entonces, hagamos una descripción más sencilla. Las hormigas *Leptothorax* se distribuyen en todo el globo terrestre desde Alaska hasta las zonas tropicales. Son hormigas sumamente pequeñas, con un tamaño de menos de dos milímetros en individuos adultos. Una colonia típica posee



algunos centenares de miembros, aunque cincuenta o menos es un tamaño común. Son sumamente uniformes morfológicamente y no poseen castas sociales (tales como soldados). De hecho, viven perfectamente bien sin una reina y muchas de las colonias que pueden encontrarse en la naturaleza no la tienen. No les resulta esencial, a diferencia de lo que puede ocurrir en otros grupos sociales, un individuo dominante que dirija o controle la vida de la colonia. Estas hormigas poseen un sistema de comunicaciones complejo, pero el mecanismo principal de comunicación es el contacto físico directo que realizan al tocarse con las antenas, las cuales están bien equipadas con una rica variedad de potentes receptores químicos y mecánicos. No son de ninguna manera hormigas “primitivas” o “simples” desde el punto de vista evolutivo, pues poseen una organización social muy desarrollada y un repertorio muy amplio de conductas individuales y colectivas.

En resumen, se trata de hormigas comunes y corrientes, distribuidas ampliamente por todo el mundo, que forman colonias con números pequeños de miembros; son homogéneas morfológicamente

te hablando y no requieren reinas u otros gobernantes para el funcionamiento adecuado de la colonia, y, por último, las comunicaciones entre los individuos se realizan principalmente a través del contacto directo entre pares de individuos. Esta descripción, como veremos más adelante, resulta de gran importancia para la construcción de modelos matemáticos de conducta que sean capaces de reproducir, con todo esplendor, la complejidad del fenómeno social. Veamos ahora con más detalle qué podemos entender por complejidad.

Complejidad, orden y organización

La complejidad es el problema central de la llamada ciencia de los sistemas complejos y está relacionada con las propiedades que emergen de las interacciones de varios elementos similares. Está relacionada, además, con la generación espontánea de orden que se manifiesta en varias escalas temporales y espaciales diferentes a aquella en la que ocurren las interacciones. Se trata de un orden generado sin la intervención de un control central o de un plan predefinido, ya sea en el diseño estructural de los elementos o codificado

en los mecanismos de interacción. Este nuevo orden se conoce con el nombre de autoorganización y se manifiesta generalmente como una ruptura espontánea de simetría, en la que existe formación de patrones donde antes no los había, y por la posibilidad de conductas colectivas altamente organizadas, aun en la ausencia de diseños prefijados.

La organización social surge y se mantiene cuando la dinámica de la actividad de la colonia se sitúa entre el orden y el caos.

La conducta social, tanto de insectos como de cualquier otro organismo incluyendo a los humanos, es un fenómeno biológico autoorganizado. Las sociedades de insectos se basan en la existencia de unidades sociales (los individuos) que interactúan produciendo una conducta colectiva, global y emergente. De hecho, la comprensión cabal de la conducta social como el producto colectivo de interacciones individuales es sin duda uno de los grandes retos de la biología contemporánea. Obviamente, la conducta social no puede ser reducida a la conducta individual de los participantes debido a que los individuos en aislamiento no la producen. La conducta social es por lo tanto de naturaleza sinérgica y sólo la produce la participación concurrente de individuos en interacción.

Es necesario tener en cuenta que no toda agregación de individuos es necesariamente social. La conducta social sólo se expresa si los individuos pueden comunicarse entre sí y pueden modificar sus conductas individuales como consecuencia de tal comunicación (¡un conjunto de insectos nocturnos alrededor de un foco no es una colonia!). La conducta social tiene mucho que ver con expresiones de cooperación en el sentido de

que uno o más organismos sociales pueden hacer algo juntos, es decir, si dos o más individuos pueden mantenerse reaccionando unos frente a los otros y pueden mantenerse realizando alguna tarea con un fin común. Las hormigas cumplen perfectamente con la descripción anterior. No importa que las hormigas como individuos puedan ser simples o tener un limitado repertorio de conductas. La colonia, como un todo, es una estructura altamente integrada y este orden, a este nivel, proviene de las interacciones masivas y coordinadas que son facilitadas por la existencia de canales efectivos de comunicación. La conducta social puede, por lo tanto, verse como la consecuencia inevitable de estructuras interconectadas y debe considerarse como una propiedad robusta y genérica de los sistemas complejos, ya sean naturales o artificiales. ¿Inevitable?, ¿es esto posible? Al referirse a los múltiples y sorprendentes ejemplos de conductas emergentes en las sociedades de hormigas, Edward O. Wilson, uno de los biólogos de la conducta más importantes del siglo xx, afirma que “nos dan una idea de por qué la sociabilidad es tan exitosa en términos evolutivos [...] este éxito se ha expresado por lo menos doce veces en la evolución de los insectos de manera independiente y podemos por ello pensarla como si se tratase de un *atractor biológico*”. De hecho, la sociabilidad, en términos más amplios, ha surgido independientemente y de múltiples maneras en la evolución de los organismos, desde las expresiones más rudimentarias en las colonias de bacterias, hasta las sociedades humanas. Debido a ello, pareciera que la aparición del fenómeno social en la evolución de la vida fuese inevitable de la misma manera en que lo es, por ejemplo, la aparición —en varias ocasiones y de manera independiente en varios taxa— de órganos tales como los ojos y por ello se habla de atractores biológicos. En lo que respecta a los sistemas artificiales tam-

bién es posible ver cómo muchas de las propiedades colectivas surgen de manera inevitable y son, de hecho, atractores de la dinámica en dichos sistemas.

Por ahora regresemos nuevamente al hallazgo de que las colonias de hormigas *Leptothorax* se encuentran en estados desordenados —caóticos u ordenados— periódicos, dependiendo del número de los miembros de sus grupos sociales, y repitamos la pregunta ya formulada con anterioridad: ¿qué pasa en el medio de estos dos extremos?

El borde del caos

Un número creciente de estudios teóricos muestran que los sistemas conformados por una cantidad de elementos similares bajo interacción exhiben una gama muy rica de conductas dinámicas complejas cuando se encuentran en las cercanías de una zona de transición entre estados ordenados y estados desordenados (las llamadas transiciones de fase orden-desorden). Los sistemas demasiado desordenados (caóticos) o demasiado ordenados puede que no sustenten, por mencionar un ejemplo, capacidades de procesamiento de información, que en el caso de la organización social de las hormigas resulta claramente esencial. Veamos esto con más cuidado. Pensemos en un gas y pensemos en la capacidad de que tal medio sea capaz de almacenar algún tipo de información. No será difícil imaginar que la volatilidad y el desorden intrínseco de un medio gaseoso no garantizaría el almacenamiento de volúmenes de información con gran éxito. En contraste, un sólido con estructura regular se antoja mejor para ello por ser una estructura permanente y ordenada. Pensemos, por otra parte, en otro aspecto esencial de todo proceso informático: el flujo de datos. ¿Podríamos imaginar cuál de los medios resultaría más adecuado para el movimiento de datos? El medio gaseoso se antoja superior en contraste con la rigidez de una estructu-

ra ordenada. El problema es que ambos extremos de orden y desorden no garantizan las dos condiciones, almacenamiento y movilidad, de manera simultánea. ¿Y qué tal algo intermedio?, ¿resultará mejor? Los estudios teóricos apuntan a que los sistemas en donde el orden y el desorden coexisten resultan los más adecuados para dar sustento a los procesos informáticos emergentes. Tal régimen brinda también mayor capacidad y flexibilidad adaptativa a dichos sistemas. Lo anterior nos hace pensar que, de hecho, la coexistencia de orden y desorden es una condición fundamental y necesaria para la expresión espontánea de procesos “creativos” en la naturaleza.

El borde del caos es la frontera que separa el orden del desorden. Puede entenderse también como la zona en la que coexisten ambos estados y, por lo tanto, los sistemas situados en tal balance manifiestan propiedades ligadas a ambos. Sin embargo, lo más interesante no es que manifiesten propiedades compartidas de ambos extremos sino que manifiesten propiedades enteramente nuevas. Una de tales propiedades, por ejemplo, es la aparición de fluctuaciones temporales o espaciales de todos los tamaños posibles del sistema y que hacen posible que éste explore de manera más efectiva todas las configuraciones o estados disponibles. La existencia del borde del caos en la organización social de las hormigas es un hallazgo que tuvo su origen en el uso de modelos matemáticos muy simples. Muchas de las predicciones de los modelos concuerdan con las observaciones de colonias reales, tanto en un aspecto cualitativo como cuantitativo.

Hormigas virtuales

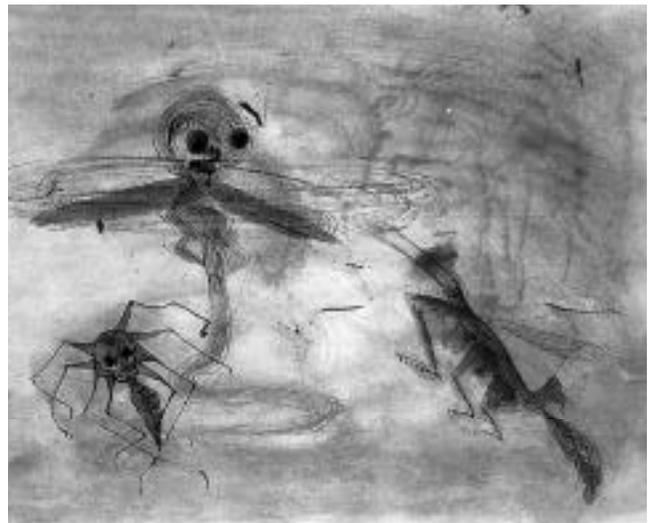
La aparición de computadoras digitales a la par de desarrollos importantes en la teoría matemática de sistemas dinámicos han permitido el surgimiento de una nueva gama de formalismos para el estudio de



sistemas complejos como lo es el fenómeno social. Tales formalismos matemáticos incluyen las redes neuronales y los autómatas celulares y cualquier híbrido imaginable entre ellos. De la biología ya descrita de las hormigas *Leptothorax* sabemos que éstas forman grupos pequeños de individuos homogéneos en los que la existencia de individuos especiales no es necesaria para el funcionamiento de la colonia; sabemos también que las interacciones ocurren a distancias cortas y, por último, que los individuos aislados pueden activarse espontáneamente y que la interacción con hormigas activas puede activar a aquellas que no lo estén. Todos estos ingredientes se pueden introducir como reglas de interacción en un modelo híbrido conocido como autómata celular móvil o como red neuronal flui-

Las hormigas virtuales muestran una muy rica variedad de conductas colectivas que no se especificaron de antemano en su construcción, sino que surgen de una forma autoorganizada. Uno de los aspectos de la conducta que surge de esta manera, y que es el que más nos interesa, es el de las oscilaciones periódicas una vez que el hormiguero virtual ha alcanzado una cierta densidad de individuos: ¡oscila espontáneamente! Este aspecto del fenómeno observado, presente también en el modelo, nos dice mucho sobre el mecanismo preciso que es responsable de generar tales oscilaciones, que no es otro que las interacciones de elementos que en lo individual son caóticos y que en lo colectivo se sincronizan para generar un estado dinámicamente coherente (ver en el recuadro: “Oscilaciones espontáneas

ciámos, puede ser modificada a nuestro antojo y podemos entonces medir cosas tales como el número de activaciones espontáneas en función de la densidad. Además, podemos medir el grado de orden y de complejidad de nuestras hormigas virtuales usando cantidades como la entropía o la complejidad algorítmica (ver en el recuadro “Hormigas en el borde del caos”). Estas medidas en su conjunto nos dejan ver que existe un pico de máxima complejidad que coincide con el punto de máxima entropía y que marca con exactitud la frontera entre el caos y el orden. Dicha frontera ocurre a densidades relativamente bajas, cercanas a un valor de 0.2. Tal densidad se sostiene para un intervalo relativamente amplio de valores de los parámetros biológicamente relevantes del modelo. Basta decir que dicho



da. Sin entrar en muchos detalles (los que se interesen pueden ver en el recuadro el inciso “Un modelo de dinámica social en hormigas) aquí describiremos este modelo como una colonia virtual formada por hormigas que “viven” en una computadora. Se trata de un nido de hormigas formadas por entes virtuales que pueden moverse e interactuar.

en un modelo de hormigas virtuales”). ¿En qué momento se alcanza tal estado de coherencia?

La densidad de hormigas en nuestro hormiguero virtual puede variarse con facilidad y por ello también resulta ventajoso para explorar aspectos que serían muy difíciles de lograr en un experimento con hormigas reales. La densidad, como de-

valor de densidad ha sido comprobado experimentalmente para convencernos de la potencia predictiva del modelo. En efecto, en un experimento llevado a cabo en Inglaterra por Nigel Franks y su grupo los nidos de varias colonias de hormigas *Leptothorax* fueron manipulados para modificar la densidad en la que se encontraban inicialmente. En dicho expe-

rimento se modificaron las fronteras del hormiguero de tal manera que el área de éstos pudiera aumentarse o disminuirse. Después de las modificaciones, las hormigas siempre reconstruyeron sus nidos para mantener una densidad relativamente constante con un valor cercano a $\rho \approx 0.2!$

El que los hormigueros reales se encuentren en la densidad que el modelo predice sugiere fuertemente que las hormigas efectivamente autorregulan tanto el área del nido como el número de los miembros de la colonia, con la finalidad de, en todo momento, situarse en la frontera entre el orden y el desorden, lo cual, a su vez, les permite, entre otras cosas, lograr la mayor plasticidad de conductas, poseer una mayor capacidad informática y que su actividad sea lo menos predecible. De hecho, debemos entender que la frontera entre el caos y el orden marca también el momento en el cual una sociedad pasa a ser tal. En otras palabras, una densidad baja de individuos hace que la tasa de contactos entre ellos sea tan baja que la colonia puede considerarse más bien como una colección de individuos aislados sin muchas posibilidades de conductas colectivas; mientras que una densidad muy alta implica individuos en una interacción tan fuerte que la dinámica colectiva queda atrapada en un estado demasiado coherente, en el que los individuos podrían verse forzados a hacer todos lo mismo y al mismo tiempo. En el borde de caos, los individuos tendrían la flexibilidad suficiente como para verse involucrados en tareas colectivas, pero preservando al mismo tiempo la expresión de parte de sus conductas individuales.

El uso de un enfoque de sistemas complejos para el estudio del fenómeno social ha dado frutos destacados en años recientes. En el contexto de la dinámica social de las hormigas, o de otros insectos sociales, el uso de modelos matemáticos simples muestra que varios de los aspectos de la conducta colectiva son meramente consecuencias de un proceso

autoorganizado de interacciones no lineales situado en el borde del caos. Que tales conductas son hasta cierto punto inevitables y que dudosamente se deben a procesos que tengan que explicarse mediante el uso de argumentos adaptativos exclusivamente, tal como es la costumbre en la biología de nuestros días, se deriva del hecho de que ¡las hormigas virtuales no tienen genes! El lector estará pensando que esta afirmación amerita un poco más de detalle, no porque sea falsa sino porque tiene consecuencias de primera importancia, en especial para una comprensión completa de la biología evolutiva. Discutamos pues este aspecto.



El mundo de las hormigas tiene ejemplos impresionantes y espectaculares de inteligencia colectiva: construcción de meganidos con cientos de millones de individuos en las hormigas japonesas *Formica yessensis*; granjas subterráneas de hongos cultivadas por las hormigas tropicales cortadoras de hojas *Atta* y muchos otros

ejemplos más. Ante esto cabe preguntarse ¿cómo y de dónde sale todo este orden?, ¿son estas actividades la simple suma de esfuerzos individuales o se trata de propiedades atribuibles a la colonia como un todo? El debate en torno a estas preguntas es más antiguo de lo que podemos imaginar. Remy Chauvin, uno de los grandes entomólogos sociales franceses del siglo XX, nos narra cómo ya en los primeros años de ese siglo el biólogo Etienne Rabaud afirmaba que los insectos sociales lo eran sólo en apariencia y eso debido a que una vaga interacción los mantenía juntos. En realidad, afirmaba Rabaud, estos seres viven como si fueran solitarios

sin mostrar el más mínimo intento para cooperar con los demás, por lo que una colonia es llanamente un conglomerado de solitarios. Ya en años recientes, William Hamilton y Richard Dawkins, ambos en la Universidad de Oxford, reformularon esta misma visión, pero esta vez apoyados en la ciencia de la genética.

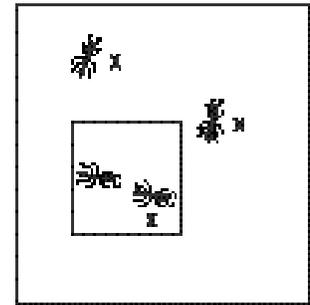
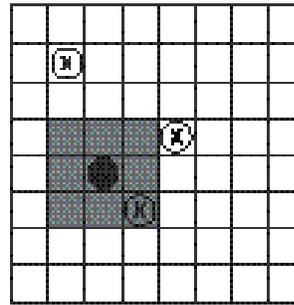
Una colonia de hormigas *Leptothorax* está formada típicamente por un número pequeño de individuos bastante homogéneos en tamaño y forma. Estas hormigas interactúan haciendo uso de sus antenas para comunicarse con las compañeras que se encuentran en su proximidad inmediata. Las hormigas activas pueden activar a las compañeras que no lo estén o bien aquellas inactivas pueden activarse espontáneamente. Estas sencillas reglas de conducta pueden codificarse en un modelo computacional simple. Cada hormiga virtual se representa como un objeto móvil en una red discreta. En la representación que se muestra arriba a la izquierda una hormiga virtual activa es un punto negro, mientras que las hormigas inactivas se representan como puntos blancos marcados con una x. La zona gris representa la zona de interacción de la hormiga activa y está formada por las ocho celdas que forman la primera vecindad de ese

punto. Dentro de esa vecindad, en este caso particular, existe una sola hormiga inactiva con la cual la hormiga virtual activa interactuará en el siguiente paso del tiempo (t+1) activando a la hormiga inactiva. En el cuadro de la derecha se representa esquemáticamente la misma situación descrita.

Para cada hormiga virtual se definen variables de estado como posición (x, y) y actividad S. La actividad de una hormiga i en el tiempo t se define como:

$$S_i^t = \tanh \left\{ g \left[\sum_{j=1}^k S_j^{t-1} \right] + S_i^{t-1} \right\}$$

donde j son las k hormigas en la vecindad de la hormiga i; g es la ganancia de la tangente hiperbólica que representa la excitabilidad de la hormiga i. La función S, así definida, tiene su dominio entre 1 y 0, de tal manera que mientras S permanezca positiva la hormiga en cuestión se considerará activa. Las hormigas activas pueden moverse aleatoriamente por la red, avanzando una celda en cada paso de tiempo. La función antes



descrita decrece con el tiempo, de tal manera que todas las hormigas finalmente se inactivan. Las que se encuentran inactivas y no sean activadas por el contacto con otra hormiga pueden activarse al azar con valor prefijado de probabilidad.

El modelo presentado arriba y que ha resultado de gran ayuda en la descripción cualitativa y cuantitativa de las dinámicas espaciales y temporales en la conducta social de las hormigas se conoce como "autómata celular móvil" o como "red neuronal fluida", y fue introducido por primera vez por este autor y sus colegas, Ricard Solé, en la Universidad Politécnica de Catalunya, España, y Brian Goodwin, entonces en la

Universidad Abierta de la Gran Bretaña.

Es importante mencionar que la función de estados de este modelo utiliza, a su vez, una tangente hiperbólica. Ésta es una función (podría ser otra) que se usa comúnmente en la modelación de redes neuronales, usadas en modelos de memorias asociativas (llamadas redes neuronales de Hopfield). La razón por la cual se escoge dicha función, en particular, es que cuando se itera consigo misma tiene un comportamiento asintótico en su valor máximo, y esta condición es necesaria ya que nunca un elemento del sistema modelado puede llegar a un estado de excitación infinita.



Experimentos con hormigueros reales han revelado que la conducta de individuos aislados es muy diferente de la conducta que muestran cuando éstos se encuentran en interacción con sus compañeros de la colonia. Los individuos aislados se activan y mueven de manera desordenada, mientras que los individuos en las colonias lo hacen de manera sincronizada y periódica. Surge de inmediato la pregunta: ¿en qué momento se pasa de un estado al otro y cuál es el mecanismo que lo genera? Para responder se diseña un "mo-

delo de autómatas celulares móviles", en el que se puede variar la densidad del hormiguero virtual y con ello observar cómo las oscilaciones emergen cuando la densidad alcanza ciertos niveles. Densidades altas implican tasas de contacto mayores entre las hormigas y por ello la coherencia y el comportamiento colectivo se manifiestan claramente. En este conjunto de gráficas se tienen cuatro casos correspondientes a densidades de 0.06, 0.2, 0.3 y 0.9. En este ejemplo, la red contenía un total de $10 \times 10 = 100$ celdas; por lo que la población absoluta fue de 6, 20, 30 y 90 individuos en cada caso. La densidad se incrementa de

arriba hacia abajo y se observa cómo en la primera gráfica (densidad = 0.06) la dinámica es francamente irregular y sin un patrón definido, mientras que en la última gráfica

(densidad = 0.9) existe un patrón periódico y ordenado. La densidad, por lo tanto, es el único parámetro responsable de la transición de fase orden-desorden.

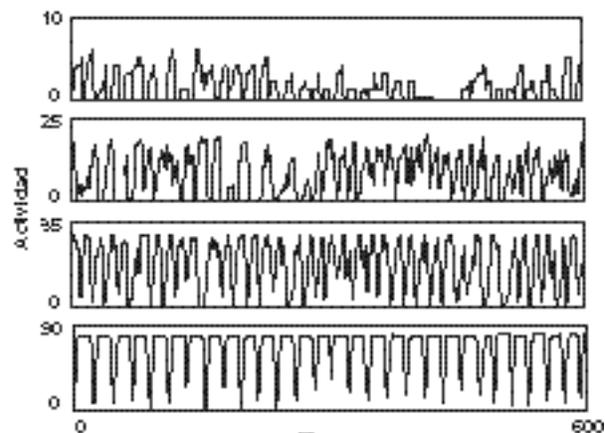




Figura 1

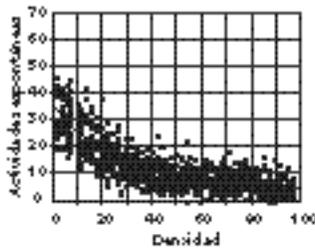


Figura 2

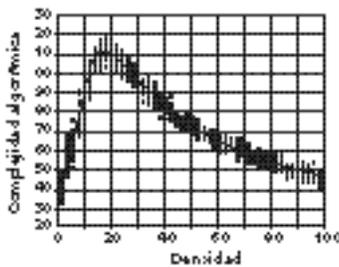
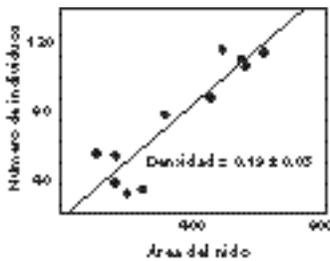


Figura 3



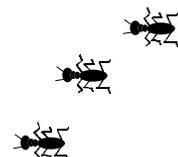
Nuestro modelo revela propiedades insospechadas presentes en la sutil dinámica social de las hormigas reales. En la primera gráfica se muestra el número de activaciones espontáneas *per capita* que ocurren en el hormiguero. Cada punto representa una serie de tiempo y se han considerado veinte réplicas para cada valor de densidad. La línea continua representa el mejor ajuste a los datos. Se observa claramente la tendencia del sistema hacia estados de mayor coherencia (menos actividades espontáneas) en función del aumento de la densidad (la escala es porcentual).

El valor exacto de densidad para el cual ocurre la transición orden-desorden y que marca la frontera entre el caos y el orden (el borde del caos) puede ser identificada con precisión mediante el uso de medidas informáticas. La entropía de Shannon-Kolmogorov, así como la complejidad algorítmica, son dos ejemplos. Aquí nos limitaremos al análisis de la última no sin antes mencionar que ambas cantidades se comportan, en el modelo, de manera muy similar. La complejidad algorítmica (introducida por el célebre matemático ruso Andrey Nikolaevich Kolmogorov (1903-1987), mide la complejidad de una serie de datos en términos del número mínimo de *bits* de un programa de cómputo que pueda reproducir la cadena de datos originales. En la práctica esto es muy difícil

de lograr, así que se han ideado maneras más simples de medir tal tamaño mínimo del programa, reduciendo el problema a la estimación del número de operaciones de "cortar" y "pegar" los unos y ceros de una serie binaria a la cual se ha reducido la serie de tiempo original. Este sencillo método nos da una buena medida de la complejidad. Se espera que tal complejidad sea mayor para dinámicas totalmente desordenadas y menor para dinámicas con un cierto grado de orden. Lo que puede observarse en la segunda gráfica es que la complejidad algorítmica en el modelo alcanza un pico máximo en una densidad cercana a 0.2. Y este valor máximo marca el sitio de la transición o de la frontera entre el orden y el caos.

En Inglaterra, Nigel Franks y sus colegas sabían con anterioridad que las hormigas *Leptothorax* se autoorganizan para construir nidos con tamaños que caen dentro de un patrón. Los experimentos que estos autores llevaron a cabo consistían en situar a una colonia de hormigas entre dos vidrios de microscopio, con cuatro pequeñas separaciones de cartón entre ambos, de tal manera que estas dos placas de vidrio sirvieran como piso y techo del futuro nido. A las hormigas se les presentó una pequeña cantidad de materiales de construcción en forma de pequeñas esferas sólidas. Este material podía estar situado, de ma-

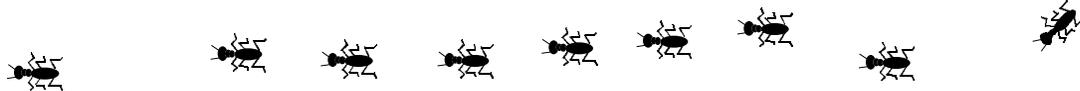
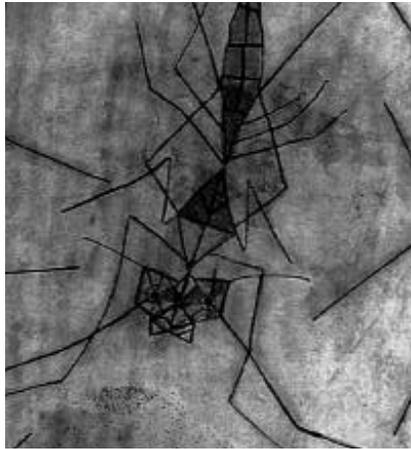
nera desordenada, dentro o fuera del sándwich de vidrio. Lo que ocurrió fue verdaderamente sorprendente: las hormigas tomaron el material y formaron un círculo con él, de tal manera que ahora tenían un nido completo con piso, techo y una pared circular; la colonia quedaba siempre situada en el centro. Una vez que los nidos eran construidos, los experimentadores deformaban el círculo de material de tal manera que el área interior disminuyese o aumentase. En ambos casos, las hormigas siempre reconstruían su nido hasta dejarlo con el área inicial. La gráfica tres es la relación entre número de individuos de una colonia y el área del nido construido. Se consideraron once colonias diferentes y se observó que la pendiente del ajuste lineal, que no es otra cosa que la densidad, tenía un valor de 0.19 ± 0.03 ! Este valor se encuentra muy cerca de aquél para el cual el modelo predice que la colonia estaría situada al borde del caos y por ello se puede afirmar que, de hecho, una colonia real se sitúa de manera autoorganizada en la frontera entre el orden y el desorden.



Ellos consideran que los insectos sociales actúan de manera egoísta con la sola finalidad de pasar sus genes a las siguientes generaciones, de tal manera que la evolución, y no sólo la de las hormigas, puede entenderse como un proceso en el que "genes egoístas" intentan pasar hacia el futuro tantas copias de sí mismos como sea posible. Hamilton y Dawkins argumentan que lo que en realidad vemos en una colonia no es una actividad cooperativa, sino el resultado de genes egoístas arreglándoselas ellos mismos vía la colonia. Todo esto podría tener alguna lógica, sin embargo, no resiste un escrutinio cuidadoso: los genes pueden afectar las conductas de los individuos, pero ¿cómo pueden afectar la conducta de una colonia como un todo? Brian Goodwin responde esta pregunta haciendo notar que lo que interactúa en una colonia son individuos y no genes, de la misma manera que en una molécula de agua hay

átomos de hidrógeno y oxígeno; pero estos átomos no explican el porqué el agua forma remolinos espirales cuando se va por una coladera. Queda claro que para explicar esta conducta del agua es necesario recurrir a otro nivel de orden y eso es justamente lo que falta en la explicación genética de la conducta social. Los

genes, o incluso los individuos, no son suficientes para explicar una conducta que se manifiesta a otro nivel. Las explicaciones basadas en genes, adecuación y selección natural pueden, si acaso, proporcionar información sobre la persistencia de ciertos patrones de conducta, pero no pueden explicar cómo se producen. Es aquí donde el estudio de los sistemas complejos aporta explicaciones sobre la aparición de esos otros niveles emergentes de organización. Nos da, por lo tanto, acceso a nuevas y más completas explicaciones sobre las verdaderas fuentes de innovación en la evolución de los seres vivos y en los sistemas artificiales que podemos diseñar y construir, y nos proporciona asombrosas y acertadas explicaciones sobre la dinámica de aquellos miles de pies que, al recorrer bulliciosamente los suelos de las selvas y bosques del mundo, marchan como camaradas entre el vaivén del orden y el caos. 



Octavio Miramontes

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer a Eliane Cecon y a Pedro Miramontes por sus valiosos comentarios y su ayuda para mejorar sustancialmente el contenido de este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bak, P. y M. Paczuski. 1995. "Complexity, contingency and criticality", en *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 92, pp. 6689-6696.
 Bonabeau, E. et al. 1997. "Self-organization and alternative models in insect societies", en *Trends Ecol. Evol.*, 12, p. 188.
 Bonabeau, E. y Théraulaz. 2000. "Swarm smarts", en *Scientific American*, marzo, 2000, pp. 54-61.
 Cole, B. et al. 1996. "Mobile Cellular Automata models of ant behavior—Movement activity of *Leptothorax allardyei*", en *American Naturalist*, 148, pp. 1-15.
 Cole, B. J. 1991. "Is animal behaviour chaotic?: evidence from the activity of ants", en *Proc. R. Soc. London B*, 244, pp. 253-259.

Cole, B. J. 1991. "Short-term activity cycles in ants: generation of periodicity by worker interaction", en *American Naturalist*, 137, pp. 244-259.
 Chauvin, R. 1970. *The world of ants: a science fiction universe*. Victor Gollanz, Londres.
 Donisthorpe, J. K. 1915. *British ants*. Brendon & Sons, Plymouth.
 Franks, N. R. et al. 1990. "Synchronization of the behaviour within nests of the ant *Leptothorax acervorum* (Fabricius): I. Discovering the phenomenon and its relation to the level of starvation", en *Bull. Math. Biol.*, 52, pp. 597-612.
 Franks, N. R., A. Wilby, B. W. Silverman y C. Tofts. 1992. "Self-organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing", en *Anim. Behav.*, 44, pp. 357-375.
 Goodwin, B. C. 1998. "All for one...", en *New Scientist*, 13, junio, 1998, pp. 32-35.
 Miramontes, O. 1995. "Order-disorder transitions in the behavior of ant societies", en *Complexity*, 1(3), pp. 56-60.
 Miramontes, O., R. Solé y B. C. Goodwin. 1993. "Collective behaviour of random activated mobile cellular automata", en *Physica D*, 63, pp. 145-160.
 Miramontes, O., R. Solé y B. C. Goodwin. 1993. "Antichaos in Ants: The Excitability Metaphor at Two Hierarchical Levels", en *Proceedings of*

the Second European Conference on Artificial Life. Bruselas.

Solé R. V. et al. 1996. "Complejidad en la frontera del caos", en *Investigación y Ciencia* (edición española del *Scientific American*), núm. 236, pp. 14-21.
 Solé, R. V., O. Miramontes y B. C. Goodwin. 1993. "Emergent Behaviour in Insect Societies: Global Oscillations, Chaos and Computation", en H. Haken y A. Mikhailov, eds., *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*. Springer-Verlag, Berlin.
 Solé, R. y O. Miramontes. 1995. "Information at the edge of chaos in fluid neural networks", en *Physica D*, 80, pp. 171-180.
 Solé, R., O. Miramontes y B. C. Goodwin. 1993. "Collective oscillations and chaos in the dynamics of ant societies", en *J. Theor Biol.*, 161, p. 343.

IMÁGENES

Francisco Toledo, *Serie Insectario* I, II, 1995-1997.

