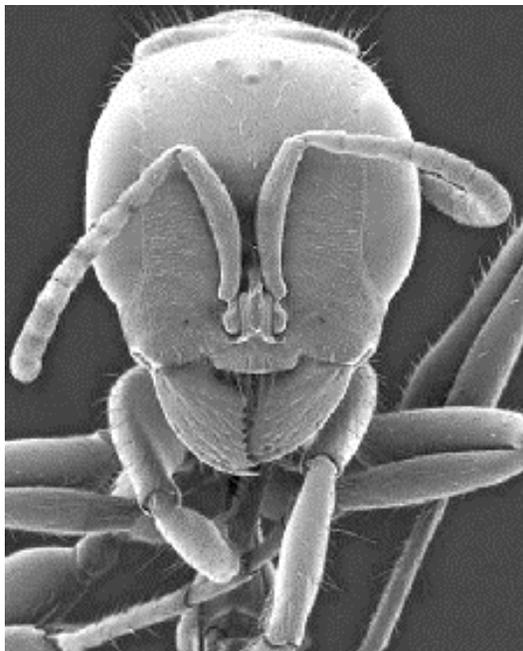


ORDEN Y CAOS EN LA ORGANIZACION SOCIAL DE LAS HORMIGAS

Octavio Miramontes
Departamento de Sistemas Complejos
Instituto de Física, UNAM
México D.F. México

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 desde 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 las actividades de los diminutos individuos en la intimidad de sus nidos. ¿Que se encontró?

De caos y descansos

Estudios realizados por los grupos de investigación de Blain Cole en los Estados Unidos y Nigel Franks en Inglaterra, revelaron que en ciertas especies de hormigas del género *Leptothorax*, los individuos podían pasar hasta un 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 15 y 20 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 determinista¹. 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 estos insectos: la organización social al borde del caos. Pero antes de entrar en los detalles sobre el significado de esta última frase, echemos un vistazo a la vida cotidiana de estas hormigas.

Hormigas con temperamento tímido

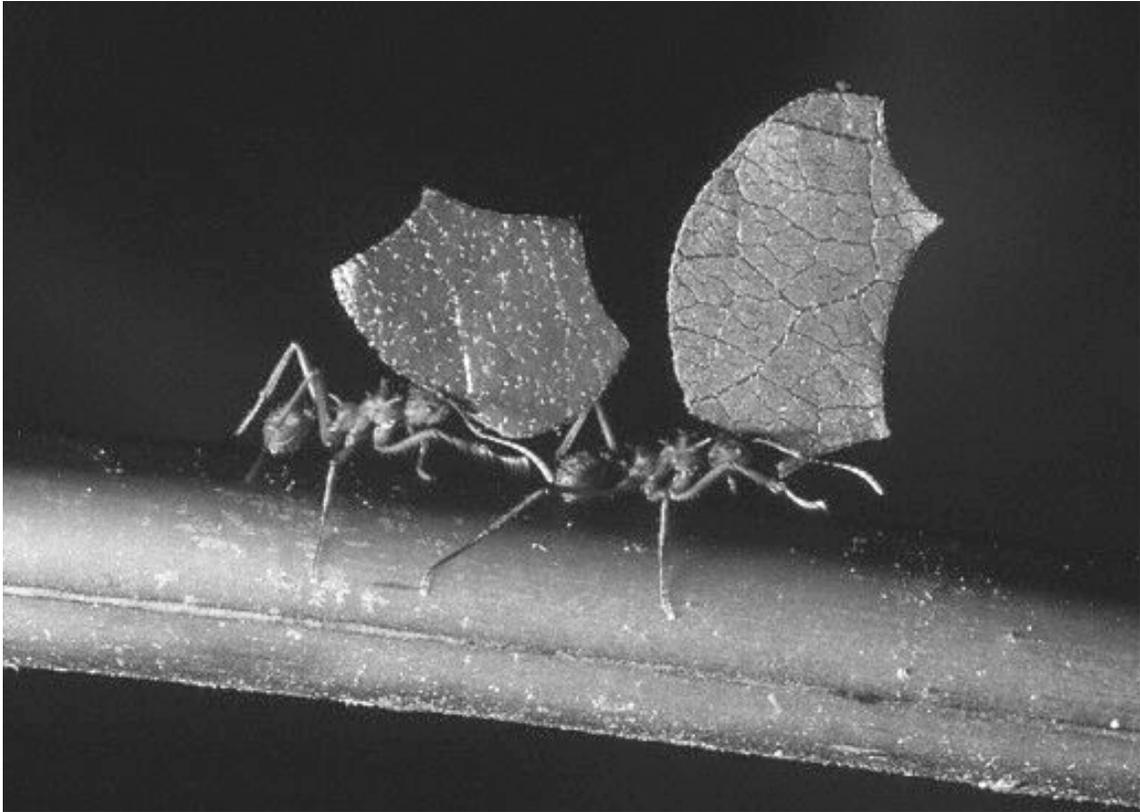
Donisthorpe, uno de los entomólogos británicos más afamados del siglo XIX, describió a las hormigas del género *Leptothorax* como “ágiles, robustas y resistentes, con un temperamento tímido y adaptable”². El lector estará de acuerdo en que, hoy en día, una descripción de este tipo no resulta totalmente aceptable debido a que no podemos transferir a un patrón de conducta animal aquellas características propias de los humanos. Las hormigas *Leptothorax* se distribuyen en todo el globo terrestre desde Alaska hasta las zonas tropicales. Son hormigas sumamente pequeñas, con un tamaño típico de menos de tres milímetros en individuos adultos. Una colonia típica posee algunos centenares de miembros, aunque 50 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. No son de ninguna manera hormigas “primitivas” o “simples” desde el punto de vista evolutivo. 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 por todo el mundo. Forman colonias con números pequeños de miembros. Son homogéneas morfológicamente hablando y no requieren de 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, sin embargo; una vez elaborados nos serán exclusivamente modelos para estas hormigas sino para todos aquellos organismo conocidos o por conocerse que posean tales características conductuales y que manifiesten, con todo esplendor, la complejidad del fenómeno social.

Complejidad, orden y organización social

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 entre 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 simetría³ en la que existe formación de patrones donde antes no los había y por la posibilidad de conductas colectivas altamente organizadas, aún en la ausencia de diseños prefijados.

La conducta social, tanto de insectos como de cualquier otro organismo incluyendo a los humanos, son fenómenos biológicos autoorganizados. Las sociedades de insectos se basan en la

existencia de unidades sociales (los individuos) que interactúan entre ellos para producir 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 sinérgica⁴ 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 si 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, puede esto ser 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 XX⁵, afirma que “nos dan una idea de porque 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*”⁶. La sociabilidad, en términos aún 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 el surgimiento del fenómeno social en la evolución de la vida, fuese inevitable de la misma manera que lo es, por ejemplo, la aparición en varias ocasiones y de manera independiente de órganos tales como los ojos y por ello se habla de atractores biológicos⁷. En lo que respecta a los sistemas artificiales, veremos como las propiedades colectivas surgen de manera inevitable y son de hecho, atractores de la dinámica en dichos sistemas

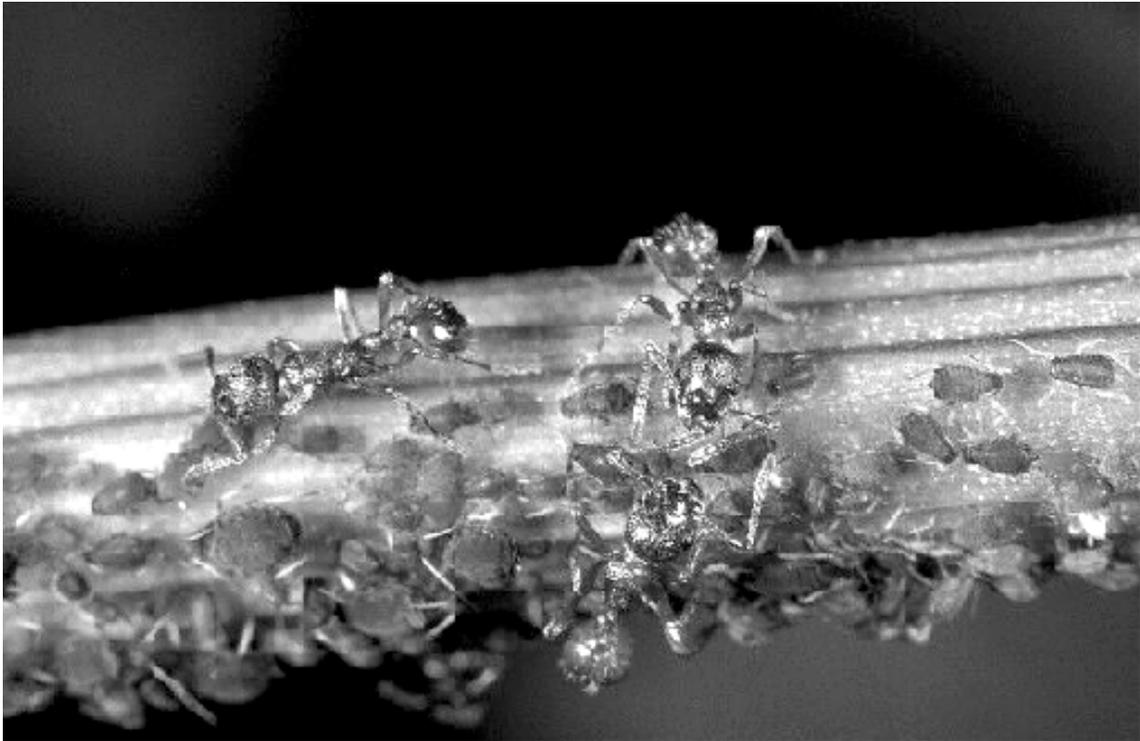
Por ahora, regresemos nuevamente al hallazgo de que las hormigas *Leptothorax*, se encuentran en estados desordenados-caóticos u ordenados-periódicos, dependiendo del número de los miembros de sus grupos sociales y repitamos la pregunta ya formulada con anterioridad ¿que pasa en el medio, entre estos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

El borde del caos: motor de la creatividad

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 conducta 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 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.

para dar sustento a los procesos informáticos emergentes. Tal régimen de coexistencia brinda también mayor capacidad y flexibilidad adaptativa a dichos sistemas. Lo anterior nos hace pensar en 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.



Pensemos, por otra parte, en otro aspecto esencial de todo proceso informático: el flujo de datos. Podríamos imaginar cual de los medios resultaría más adecuado para el movimiento de datos? El medio gaseoso se antoja superior en contraste con la rigidez de una estructura ordenada. El problema es que ambos extremos de orden y desorden no garantizan las dos condiciones, almacenamiento y movilidad, de manera simultánea. ¿Y que tal algo intermedio, resultará mejor? Los estudios teóricos apuntan a que los sistemas en lo que el orden y el desorden coexisten resultan los más adecuados

El borde del caos⁸ es la frontera que separa el orden del desorden. Puede entenderse también como la zona en la que coexiste 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 el que éste explore de

manera más efectiva todas las configuraciones o estados disponibles⁹. 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 y que serán descritos detalladamente a continuación. Muchas de las predicciones de los modelos concuerdan con las observaciones de colonias reales, tanto en un aspecto cualitativo como cuantitativo.

Hormigas virtuales y sociedades artificiales

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 a las redes neuronales y los autómatas celulares¹⁰ y cualquier híbrido imaginable entre ellos. De la biología ya descrita de las hormigas *Leptothorax* sabemos que estas forman grupos pequeños de individuos homogéneos en los que la existencia de individuos especiales no es necesaria para el funcionamiento de la colonia. Sabemos que las interacciones ocurren a distancias cortas. Sabemos 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 también conocido como red neuronal fluida. Sin entrar en muchos detalles aquí (ver el recuadro 1), 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 entre ellos.

Las hormigas virtuales muestran una muy rica variedad de conductas colectivas que no han sido especificadas de antemano en su construcción sino que surgen de una manera autoorganizada. Uno de los aspectos de la conducta que surge de esta manera y que es el que más nos interesa aquí, 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 y que no es otro que las interacciones entre elementos que en lo individual son caóticos y que en lo colectivo se sincronizan para generar un estado dinámicamente coherente (ver recuadro 2). ¿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 decíamos, puede variarse a nuestro antojo y podemos entonces medir cosas tales como el número de activaciones espontáneas en función de la densidad. Podemos además medir el grado de orden y de complejidad de nuestras hormigas virtuales usando cantidades tales como la entropía o la complejidad algorítmica (ver el recuadro 3). Tales 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. Esta frontera ocurre a densidades relativamente bajas, cercanas a un valor de 0.2. Tal densidad se sostiene para un rango relativamente amplio de valores de los parámetros biológicamente relevantes del modelo. Basta decir que tal valor de densidad ha sido comprobado experimentalmente para convencernos de la potencia predictiva del modelo. En efecto, en un experimento llevado a cabo por Nigel Franks y su grupo en Inglaterra, los nidos de varias colonias de hormigas *Leptothorax* fueron manipulados para modificar la densidad en la que se encontraban inicialmente. En tales experimentos se modificaron las fronteras del hormiguero de tal manera que el área de estos 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 0.2!

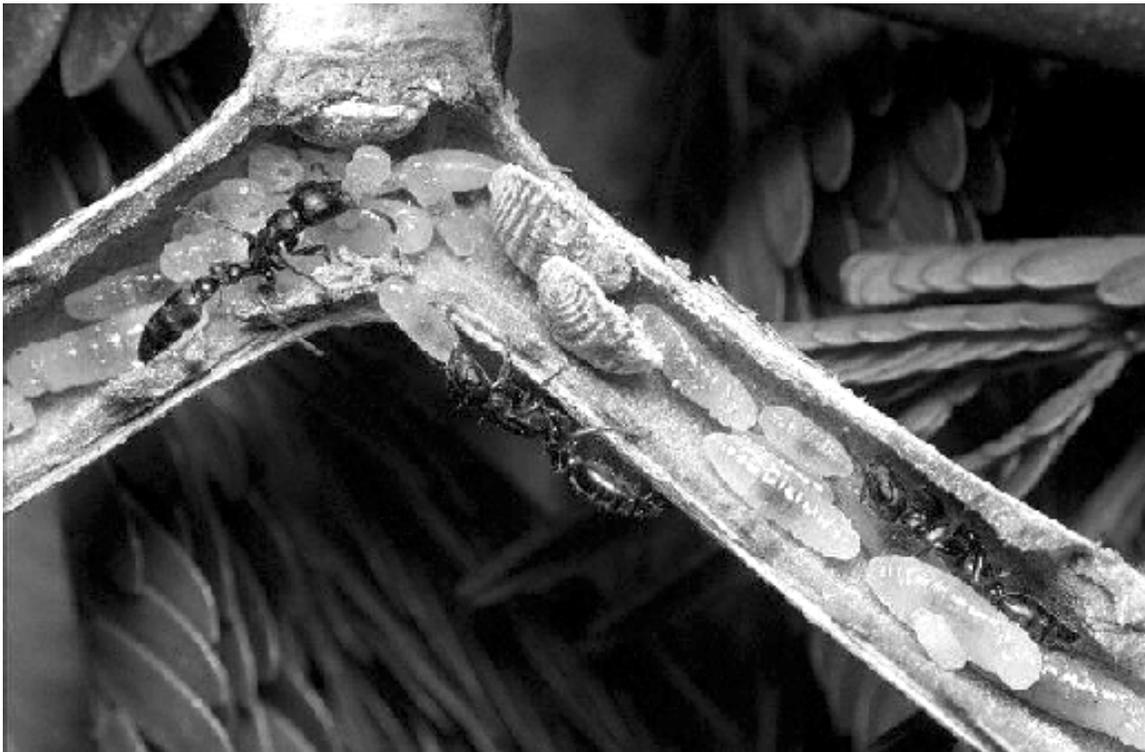
El que los hormigueros reales se encuentren en la densidad que el modelo predice, sugiere fuertemente que las hormigas reales efectivamente autoregulan tanto el área del nido como el número de los miembros de la colonia con la finalidad de, en todo momento, situarse en la frontera entre el orden y el desorden. Lo cual a su vez les permite lograr la mayor plasticidad de conductas, poseer una mayor capacidad informática y que su actividad sea lo menos predecible, entre otras cosas. De hecho, debemos entender que la frontera entre el caos y el orden marca también el momento en la cual una sociedad pasa a ser tal. En otras palabras, una densidad

baja de individuos hace que la tasa de contactos ellos sea tan baja que la colonia debe 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, todos 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 deban explicarse mediante el uso de argumentos adaptativos exclusivamente, tal como es la costumbre en la biología de nuestros días, ¡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 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 mega-nidos 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 ¿como y de donde 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 como 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 solitarios¹¹. 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. 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 si 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 ¿como 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 social¹². 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 explicar, si acaso, 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. 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.

Agradecimientos

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

Bibliografía

- Bonabeau, E. et al. (1997) "Self-organization and alternative models in insect societies", *Trends Ecol. Evol.* **12**: 188.
- Bonabeau, E. y Théraulaz (2000) "Swarm smarts" *Scientific American*, March 2000: 54-61.
- Bak, P & Paczuski, M. (1995) "Complexity, contingency and criticality" *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **92**: 6689-6696.
- Cole, B.J. (1991) "Short-term activity cycles in ants: generation of periodicity by worker interaction", *American Naturalist*. **137**: 244-259.
- Cole, B.J. (1991) "Is animal behaviour chaotic?: evidence from the activity of ants", *Proc. R. Soc. London B* **244**: 253-259.
- Cole, B. Et al. (1996) "Mobile Cellular Automata models of ant behavior – Movement activity of *Leptothorax allardycei*". *American Naturalist* **148**: 1-15.
- 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", *Bull. Math. Biol.* **52**: 597-612.
- Franks, N.R., Wilby, A., Silverman, B.W. y Tofts, C. (1992). "Self-organizing nest construction in ants: sophisticated building by blind bulldozing", *Anim. Behav.* **44**: 357-375.
- Miramontes, O., Solé, R. & Goodwin, B.C (1993) "Collective behaviour of random activated mobile cellular automata", *Physica D* **63**, 145-160.

- Miramontes, O., R. Solé and B.C. Goodwin (1993). "Antichaos in Ants: The Excitability Metaphor at Two Hierarchical Levels". In: *Proceedings of the Second European Conference on Artificial Life*, Brussels, Belgium.
- Miramontes, O. (1995) "Order-disorder transitions in the behavior of ant societies", *Complexity* **1**(3): 56-60.
- Solé, R., O. Miramontes and B.C. Goodwin (1993). "Collective oscillations and chaos in the dynamics of ant societies". *J. theor Biol.* **161**:343.
- Solé, R. y Miramontes, O. (1995). "Information at the edge of chaos in fluid neural networks", *Physica D* **80**: 171-180.
- Solé R.V. et al. (1996) "Complejidad en la frontera del caos", *Investigacion y Ciencia* (edición española del Scientific American) No. 236 : p14-21.
- Solé, R.V., O. Miramontes and B.C. Goodwin (1993). "Emergent Behaviour in Insect Societies: Global Oscillations, Chaos and Computation". En: Haken, H. and A. Mikhailov (eds), *Interdisciplinary Approaches to Nonlinear Complex Systems*. Springer-Verlag, Berlin.

Recursos en Internet

- Algunos textos sobre complejidad y organización social en insectos pueden encontrarse en la página del autor:
<http://scifunam.ifisicacu.unam.mx/mir/biol.html>
- (<http://sevilleta.unm.edu/~bmilne/bio576/insr/html/SOS/sos.html>) es la página de Ethan H. Decker y contiene una excelente discusión sobre conceptos

de borde de caos y complejidad en biología.

- Rob Burgess, de la Universidad de Miami, tiene una simulación en Java de un hormiguero virtual modelado con una red neuronal fluida y puede consultarse en la siguiente dirección:
<http://pomacea.cox.miami.edu/~rob/fnn/FNmain.html>

Notas

¹ El caos determinista es un régimen dinámico caracterizado por fluctuaciones temporales aparentemente erráticas, que no son generadas por mecanismos aleatorios sino por una regla, una función o un proceso dinámico determinista. Se dice también que los sistemas caóticos poseen sensibilidad a las condiciones iniciales, lo cual quiere decir que trayectorias de estos, inicialmente muy cercanas, se separan con el tiempo, volviendo imposible una predicción a largo plazo. Véase: Gleick, J. (1987) "Chaos". Vintage books: London.

² Donisthorpe, J.K. (1915) "British ants". Brendon & Sons, Plymouth.

³ El rompimiento de simetría es la emergencia del concepto de espacio en un sistema en el que previamente el espacio no podía ser percibido de una manera intrínseca. Un ejemplo típico de este fenómeno es la convección térmica en los fluidos (agua, por ejemplo) donde las diferencias de temperatura dan lugar a la formación de estructuras espaciales compartimentalizadas, llamadas también celdas de convección. Antes de que el agua sea calentada, tales estructuras no existen y el medio acuoso es uniforme.

⁴ Hermann Haken (1927-). Introdujo el término sinérgica para referirse al estudio interdisciplinario de los sistemas compuestos por muchas partes individuales y que pueden producir estructuras espaciales o temporales de una manera autorganizada. Básicamente, se refiere a aquellos procesos en los cuales el todo es más que la suma de los componentes por separado. Véase: H. Haken (1986) "Fórmulas de éxito en la naturaleza – Sinérgica: la doctrina de la acción en conjunto". Editorial Salvat, Barcelona.

⁵ Edward O. Wilson es uno de los autores más reconocidos en la entomología social moderna. Es autor junto con B. Hölldobler de uno de los tratados más importantes de la biología de hormigas ("The Ants" (1991) Berlin: Springer-Verlag). Pero Wilson es aún más conocido por estar en el centro de una de las controversias más importantes de la biología en los últimos tiempos y que se conoció, en la década de 1970, como "el debate sociobiológico". Según Wilson y sus seguidores, muchas de las características de la conducta animal están determinadas genéticamente. Esto pareciera aceptable en una primera aproximación; pero deja de serlo cuando se transfiere sin más a los humanos y entonces, el lector puede imaginar, sirve para justificar argumentaciones racistas tales como la "superioridad de los blancos" o cosas similares.

⁶ Véase: Lewin, R. (1997) "Complexity: Life at the edge of chaos". Phoenix, London.

⁷ El término "atractor biológico" ha sido popularizado por Brian Goodwin, uno de los fundadores de la biología teórica moderna, para referirse a la generación de orden y forma en los organismos. Véase: Varela, F. y Stein, W. Eds (1992) "Thinking about biology" Addison-Wesley.

⁸ El término *edge of chaos* (borde del caos) fue popularizado por Chris Langton cuando estudió sistemas que realizan procesamiento de información de manera emergente. Véase: Langton, C.G. (1990) "Computation at the edge of chaos: phase transitions and emergent computation" *Physica D* 42: 12-37.

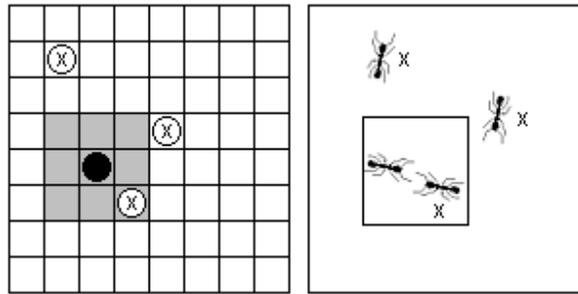
⁹ Véase: "Order for free", *New Scientist*, 13 February 1993: 10-11. y Ruthen, R "Adapting to complexity", *Scientific American*, January 1993: 110-117.

¹⁰ Los autómatas celulares y las redes neuronales, son sistemas dinámicos son elementos discretos que interactúan en espacio discretos. Su uso es cada vez más común en la modelación de diversos procesos en la naturaleza, desde la astrofísica, la economía o el funcionamiento de la memoria en el cerebro, entre muchos ejemplos. Véase: Wolfram, S. (ed.) (1986). *Theory and applications of cellular automata: (including selected papers 1983-1986)*. (Singapore : World Scientific) y Amit, D.J. (1989). *Modeling brain function: the world of attractor neural networks*, (Cambridge: Cambridge University Press).

¹¹ Véase: Chauvin, R. (1970) "The world of ants: a science fiction universe". London: Victor Gollanz LTD.

¹² Goodwin, B.C. (1998) "All for one..." *New Scientist*, 13 June 1998: 32-35.

RECUADRO 1



Un modelo de dinámica social en hormigas

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 esta 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:

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

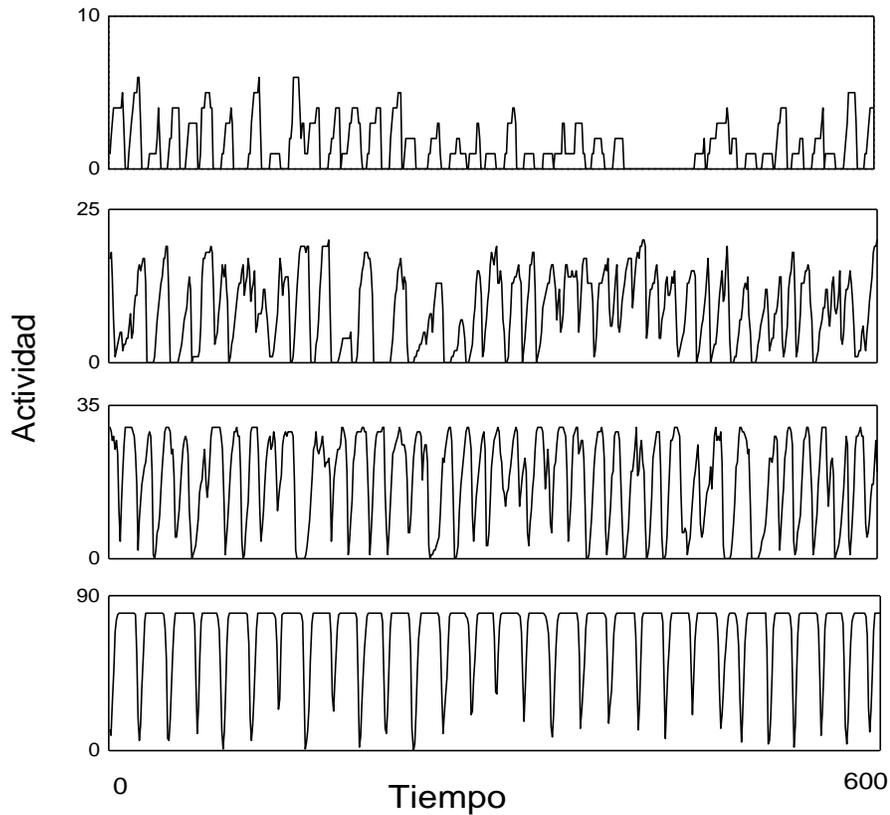
Donde j son las k -hormigas en la vecindad de la hormiga i ; g es la ganancia de la tangente hiperbólica que representa la excitabilidad de la hormiga i . La función S , así definida, tiene su dominio entre 1 y 0, de tal manera que mientras S permanezca positiva, la hormiga en cuestión se considerará 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 encuentren 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 en 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. Esta 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 a su valor máximo y esta condición es necesaria, ya que nunca un elemento del sistema modelado puede llegar a un estado de excitación infinita.

RECUADRO 2

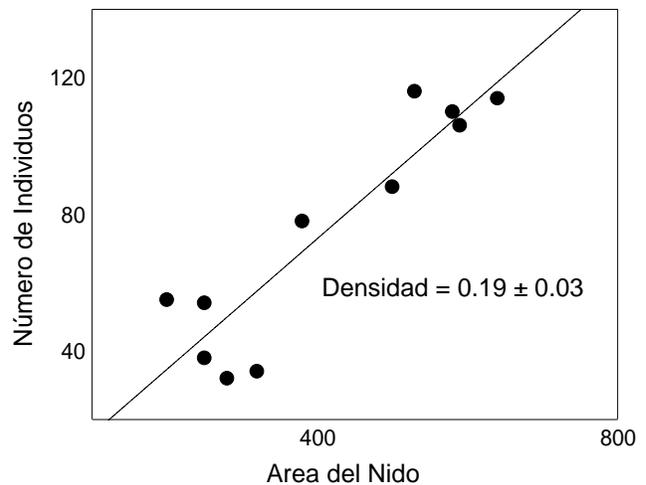
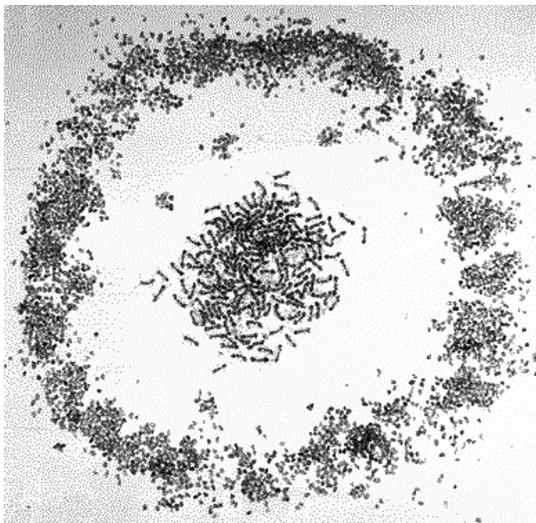
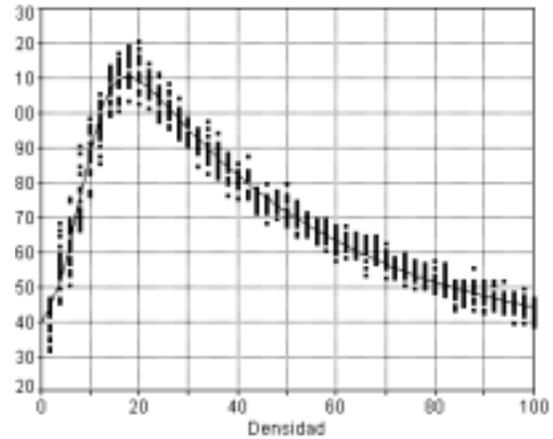
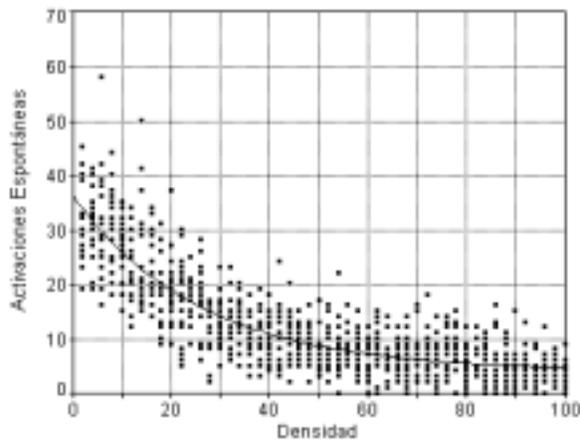


F
r
c
i
F
F
c
c
h
e

os es
de la
e los
to la
era?
iar la
do la
e las
e. En
0.3 y

0.9. En este ejemplo, la red comienza un total de $10 \times 10 = 100$ células; por lo que la población absoluta fue de 6, 20, 30 y 90 individuos en cada caso. La densidad se incrementa de arriba a abajo y se observa como 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.

RECUADRO 3



Hormigas en el borde del caos

Nuestro modelo revela propiedades insospechadas presentes en la sutil dinámica social de las hormigas reales. En la gráfica superior izquierda, 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 20 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 gráfica superior derecha, 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.

Nigel Franks y sus colegas en Inglaterra, 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 manera desordenada, dentro o fuera del sandwich 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 (como se muestra en la fotografía de arriba); la colonia quedaba siempre situada en el centro. Una vez que los nidos era construidos, los experimentadores deformaban el círculo de material de tal manera que el área interior disminuyese o aumentase. En ambos caso, las hormigas siempre reconstruían su nido hasta dejarlo con el área inicial. La gráfica que se muestra en la parte inferior derecha, es la relación entre número de individuos de una colonia y el área del nido construido. Se consideraron once colonias diferente 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 aquel, 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.