



IV

Contribución de la física de los sistemas complejos al estudio de los fenómenos sociales

Octavio Miramontes¹

El estudio de los fenómenos sociales es hoy en día un tema de interés para la física, concretamente para la física de los fenómenos complejos. A pesar de la naturaleza de este fenómeno, tradicionalmente reservados a otras disciplinas como la psicología, la sociología, la historia, la economía, etc., también la física tiene mucho que decir hoy al respecto, a tal punto de que existen subdisciplinas tales como la econofísica y la sociofísica. Pero los sistemas complejos no solamente se interesan por los fenómenos sociales de la naturaleza humana, sino también por las sociedades de otros seres vivos, desde los primates hasta las bacterias e incluso de plantas. No puede dejar de mencionarse el hecho de que también las sociedades artificiales son potenciales sujetos de estudio: los robots, las criaturas digitales en un computador o el ciberespacio e incluso las posibles sociedades extra terrestres, si éstas se encuentran algún día. ¿Cómo puede ser esto posible? La ciencia de los sistemas complejos se interesa por el fenómeno social como una propiedad emergente de un colectivo de individuos en interacción sin importar demasiado los detalles materiales de tales individuos. Por ello el estudio de los fenómenos sociales resulta ser, como lo es en sí el estudio de la complejidad, una ciencia profundamente interdisciplinaria.

Imaginemos un estadio de fútbol en la copa del mundo México 86. Argentina enfrenta a Alemania en un partido cargado de emoción y cuya dinámica se desenvuelve entre los gritos de la multitud que alegre canta y baila. Súbitamente, en algún lugar de las tribunas, un grupo inquieto de aficionados se levanta de su asiento al mismo tiempo y con las manos arriba grita: "¡Hurra!" Este acto es contagiado a otro grupo que se encuentra en la proximidad y así sucesivamente. Al poco tiempo, en cuestión de segundos, hay en el estadio una tribuna con vida propia: un grupo de aficionados se pone de pie y grita alzando los brazos y desde lejos parece una ola que avanza dando vueltas al estadio. Nadie lo planeó así, de esa manera; nadie dio la orden para que ese grupo inicial se levantara con la finalidad de que el estadio entero lo imitara; pero, hacia el final del partido, cuando el marcador ya apunta hacia la victoria de los sudamericanos, ha nacido un fenómeno colectivo que dará la vuelta al mundo entero: ha surgido la "ola mexicana". Éste bien podría ser un caso para los psicólogos sociales que estudiaran el perfil de los aficionados y su predisposición a identificarse e imitarse; pero también es un caso para la física de los procesos sociales que se interesara por explicar la velocidad con la que la onda se propaga, el ancho de frente de onda y cómo surge exactamente tras la sincronización espontánea de un grupo de individuos. Después de comprender la mecánica de este curioso suceso, los físicos aportarán un modelo matemático que predecirá esta conducta, pero no sólo entre aficionados, sino también entre cualquier otro grupo de individuos, no necesariamente humanos. Lo que se aportará es la descripción de una propiedad genérica y la ley que regula el fenómeno, sin importar si son argentinos o noruegos o si el partido tiene lugar en Moscú y no en México.

¹ Departamento de Sistemas Complejos, Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

Un gran aporte de las ciencias de los sistemas complejos a 1, comprensión de los fenómenos sociales ha consistido principal mente en el desarrollo de modelos computacionales conocido: como *modelos de agentes* o *modelos basados en individuos*, los cuales consisten en un conjunto de partículas, los agentes, que tienen reglas de conducta y que pueden interactuar entre sí en un cierto espacio para modificar tales conductas. Este proceso simple es la base de todo fenómeno colectivo de carácter social. La capacidad de interactuar con otros individuos similares puede originar respuestas que no existían en la escala local, pero que emergen espontáneamente en una escala mayor, exactamente como sucede con la ola mexicana. Los modelos de agentes han sido extremadamente útiles para el estudio de procesos sociales de tipo urbanos, políticos, económicos, de cooperación, de conducta de masas, etc. Un ejemplo notable lo constituye el fenómeno de agregación y desagregación basado en la tolerancia; supongamos que tenemos un gran número de individuos que interactúan y que son móviles pero que tienden a quedarse inmóviles cuando tienen en su cercanía inmediata a un grupo de individuos que comparte una misma característica, que puede ser la condición socio-económica, raza o cultura con la cual se identifican. Si lo que tenemos es una población humana, en algún asentamiento urbano primario, esta dinámica de tolerancia-intolerancia evolucionar con el tiempo, dando lugar a patrones espaciales que no son otra cosa que los barrios característicos de una ciudad. Los ricos se juntarán en ciertos barrios, los pobres en otros. Los judíos se irán a otro y también lo harán los escritores, músicos y artistas, hasta que finalmente tengamos un mosaico formado por conglomerados de barrios con una personalidad propia; pero eso sí, de nuevo veremos que nadie, ningún arquitecto, ningún encargado de planeación urbana, dijo sobre un mapa que, por ejemplo, Polanco sería de los judíos, que el Pedregal de los ricos y que Coyoacán asiento de los intelectuales.

Si lleváramos al extremo la intolerancia, más o menos como existe en el mundo de hoy, entenderíamos que árabes y judíos nunca podrán convivir juntos y que lo mejor sería separarlos definitivamente, a menos que se emprendiera una campaña masiva y muy creativa para fomentar la tolerancia en las generaciones futuras. Una situación tan extrema como ésta no ha existido siempre; pensemos en la ciudad de Toledo en España, en los tiempos en que Castilla era una potencia, y veremos que la tolerancia hizo posible la convivencia religiosa que permite que en menos de 100 metros cuadrados existan una mezquita, una sinagoga y una iglesia católica. Podemos visitar otro ejemplo: en el Londres de hoy es posible ver blancos y negros conviviendo con cierta armonía, aun cuando los barrios sureños de la ciudad son fundamentalmente de negros; pero una situación así sería inimaginable en los Estados Unidos de los años cuarenta, digamos en estados sureños donde el Ku-Klux-Klan se encargaría del odio racial para acabar segregando a la población negra en los barrios más marginados. Los modelos de agentes nos permiten estudiar estas dinámicas sociales para, por ejemplo, comprender cómo se originan la marginación y la exclusión social; asimismo, nos permite estudiar la dinámica del surgimiento espontáneo de grupos y su interacción global y cómo la tolerancia-intolerancia puede traer consecuencias positivas o negativas para el conjunto social o para el funcionamiento correcto y eficiente de las organizaciones públicas o productivas.

Un grupo de conductas sociales que existen incluso en humanos, son las llamadas *conductas por imitación*. En esas conductas, los humanos estamos despojados, o casi, de nuestra tan floreada capacidad

de racionalizar. Estas conductas son las que se dan cuando los individuos en interacción únicamente tienen acceso a información local de nuestros vecinos más próximos y tendemos a imitar lo que los demás están haciendo. Por ejemplo, cuando estalla un incendio en un cine y alguien grita: "¡Fuego!", sucede que las conductas que siguen no son racionales y, si inicialmente un grupo corre hacia un pasillo, la mayoría lo hará tras ellos, incluso si, desafortunadamente, sucede que ese pasillo desemboca en una puerta cerrada con llave.

La conducta de imitación también se expresa, dejando a los humanos de lado, en un bello concierto de vuelo de las aves al atardecer. ¿No hemos visto esas aves volando en parvas de miles como enjambres de insectos sin que exista un líder que indique la dirección a seguir? sin que acaben chocando entre sí o acaben sin llevar un rumbo fijo? También hemos visto los cardúmenes nadar en sincronía formando incluso estructuras como vórtices coordinados. ¿Y qué decir de las compras multitudinarias en el cierre de operaciones de una casa de bolsa? ¿o las compras multitudinarias en las ofertas instantáneas en una tienda de ropa? En todos estos casos, la conducta de los individuos interactuando localmente acaba por producir fenómenos a una escala mayor, como si un nuevo orden emergiera aparentemente de la nada.

Ese nuevo orden ha surgido de manera autoorganizada sin la dirección central de nadie y sin que estuviera codificado en la estructura de los individuos que interactúan. Es, como comúnmente se dice, un orden gratuito y su origen tiene una gran relevancia porque el estudio de cómo surge es, a final de cuentas, la esencia misma de la creatividad de la naturaleza.

El estudio del orden y, por ende, del desorden, constituye la esencia del estudio de los *sistemas complejos*. Ambos extremos el orden y el desorden, han podido explicarse de manera adecuada y separadamente por la física tradicional; pero aquello que existe entre esos dos extremos, aquello que tiene cierto grado de orden y al mismo tiempo cierto grado de desorden, ahí donde existe una coexistencia de ambos, es un tópico que ha comenzado a estudiarse con éxito desde hace apenas unas décadas. De manera intuitiva podemos pensar en el orden como una condición en la que existen inmovilidad y rigidez y podemos compararlo con la estructura de un cristal que es simétrico y uniforme. El desorden en cambio, es semejante a un gas cuyas moléculas se mueven azarosamente y donde no existe una estructura fija y mucho menos simetría espacial. Cualquier configuración espacial se rompe tan rápido como se crea. ¿Qué hay en medio de estos dos extremos? En términos de los estados de la materia, sabemos que existe una fase líquida. En el caso del agua, la fase líquida contiene una combinación de estructuras moleculares que recuerdan al cristal, pero existe suficiente movilidad como para recordar su fase gaseosa. Cuando hablamos en términos de creatividad de la naturaleza, pensamos de inmediato que una de las obras más acabadas de la evolución de la materia es justamente la materia viva, y ésta, al menos como la conocemos aquí en la Tierra, sólo pudo surgir gracias a la forma líquida del agua. Ni el hielo ni el vapor son capaces de brindar las propiedades necesarias para el surgimiento y la evolución de la vida. Después de revisar este ejemplo, queda claro que ni el orden ni el desorden son tan interesantes como puede llegar a ser aquello que está en medio, y que en lo sucesivo llamaremos *zona compleja, borde del caos o transición de la fase orden-desorden*.

Un ejemplo social de este fenómeno ocurre en la sociedad de nuestros insectos, concretamente en las hormigas. Distribuida desde los trópicos a los árticos, el género *Leptothorax* constituye colonias de hormigas de tamaño pequeño, conformadas típicamente por unos cien individuos. Se trata de colonias muy compactas integradas por individuos similares donde no hay castas. Estas hormigas se comunican básicamente mediante contactos directos entre individuos usando las antenas que están equipadas con un complejo sistema sensorial para la percepción química. Se ha encontrado, mediante experimentos en laboratorio, que en el interior de los nidos las hormigas se activan y se desactivan (se inmovilizan) de manera sincronizada, con una periodicidad de aproximadamente media hora. Para responder la pregunta de si cada individuo es a su vez un oscilador periódico, se procedió a observarlos, aislados de sus compañeros. Lo que se encontró fue sorprendente: cada individuo se activa y desactiva de manera errática, sin ninguna regularidad; de hecho, tras medir cuidadosamente los parámetros necesarios en las series de tiempo, se descubrió que esta dinámica no era un proceso aleatorio sino un proceso caótico de baja dimensión. ¿De dónde surge la periodicidad?

Otros trabajos experimentales mostraron que dos individuos juntos se sincronizan un poco más, y que tres o diez se va sincronizando aún más. La respuesta era entonces obvia: la sincronización es producto de las interacciones sociales entre los individuos; y como esta nueva propiedad colectiva (la actividad periódica) no existe en los individuos aislados, se trata de un *propiedad emergente*. Éste es un sistema social muy fácil de estudiar usando modelos de agentes. Una simulación en computador mostró fácilmente que, basadas en reglas muy simples de conducta, las interacciones entre individuos generaban una sincronización colectiva a nivel de colonia. Lo importante del uso de un modelo así es que permite medir una serie de parámetros que predicen, entre otras cosas, la densidad de individuos que se necesita para generar una transición de fase orden-desorden. Este valor fue corroborado posteriormente de manera experimental, y se mostró que una colonia de estas hormigas es, de hecho, una sociedad en miniatura funcionando al borde del caos, donde la entropía es máxima y, por tanto, también lo es la capacidad informática del conjunto. También quedó claro que la complejidad algorítmica se maximiza, lo que lleva a concluir que una colonia como ésta posee la mayor variabilidad de estados conductuales posibles, es menos predecible y en ella la información fluye de manera más eficiente. Una sociedad así estaría en un estado de mayor plasticidad y adaptabilidad frente a los cambios del entorno. Éste es un ejemplo de cómo una dinámica en la que coexiste orden y caos puede tener una serie de propiedades muy interesantes; de hecho, la naturaleza se las arregla para que los sistemas complejos se encuentren en estos estados intermedios entre los dos extremos triviales. ¿Qué otros fenómenos sociales surgen cuando los sistemas que los sustentan se encuentran entre el orden y el caos? Veamos otro ejemplo en algo que hoy en día es un tema de gran interés; se trata de la estructura y dinámica de las llamadas redes complejas.

Toda interacción social puede verse en términos de un vínculo que se establece entre por lo menos dos individuos. Esta relación puede representarse como si se tratara de una red donde los elementos interactuantes fueran nodos. Regresemos a los años sesenta y atestigüemos el experimento hecho por Stanley y Milgram para develar una característica de las redes sociales. Milgram solicitó a un determinado número de personas de las ciudades de Omaha y Wichita que hiciera llegar cartas en sobres cerrados a un cierto número de individuos en Cambridge. Los destinatarios eran desconocidos para las personas de

origen, y éstas sólo podían hacer llegar cartas usando la red de amistades propias. De esta manera, un individuo solicitaba, por ejemplo, al vecino que lo ayudara porque sabía que éste tenía un primo que vivía en Bastan y que, por esta vía, la carta estaría más cerca de su destino. Después de cierto tiempo, Milgram contabilizó el número de personas intermedias y descubrió que, a pesar de los millones de habitantes que tiene Estados Unidos, sólo se necesitó, en promedio, un número muy pequeño de intermediarios: **cinco**. Milgram llamó a este curioso hallazgo "fenómeno del mundo pequeño". Ésta es justamente la frase que utilizamos al descubrir que una persona que conocemos también conoce, a su vez, a otra que nosotros conocemos, pero que no lo imaginábamos. Ésta es, sin embargo, una coincidencia posible gracias a la peculiar estructura de las redes sociales. Veamos otro ejemplo.

Kevin Bacon es un actor que hemos visto con toda seguridad en alguna película, pero que tal vez no podamos reconocer de memoria. Se trata del actor más prolífico en la historia del cine. Ha actuado en más películas que cualquier otro actor registrado en las bases de datos de alrededor de medio millón de actores de cine de todo el mundo, de todos los tiempos. Intentemos entonces imaginar la estructura de la red de coactores y coactrices alrededor de Bacon. Para esto, daremos un número, que llamaremos *número Bacon*, a las coestrellas de Bacon; es decir, todo el conjunto de actores y actrices que ya estuvieron en alguna película junto con Bacon. Éstos serán llamados Bacon-1 y son 1479 el total. Los Bacon-2 son los actores y actrices que no actuaron directamente con Bacon, pero que participaron en alguna película donde actuaron los Bacon-1; son en total 115 204. Los Bacon-3 serán los que estuvieron en alguna película junto con los Bacon 2, y que suman 285929, y así sucesivamente hasta llegar al máximo que es Bacon-10, formado por un solo actor. Para este universo de actores y actrices, el número promedio de Bacon es 3. Es decir, a pesar del medio millón de actores, cualquier actor o actriz está a 3 de haber sido coprotagonista de Bacon. Pero lo interesante, un vez que se hace el ejercicio mayúsculo de cruzar a los actores todos contra todos, es que la distancia que separa a cualquier actor o actriz, en promedio, sigue siendo un número muy pequeño. Veamos: ¿Qué tal Patricia Llaca con Marilyn Monroe? Patricia Llaca es una actriz mexicana poco conocida y su actuación más sobresaliente fue en *La habitación azul* (2001). Marilyn, por su parte, no necesita ninguna presentación. Patricia Llaca actuó en *La habitación azul* con Mario Iván Martínez, quien estuvo en *Clea and Present Danger* (1994) con Hope Lange. Lange estuvo en el *Bus Stop* (1956) con ¡Marilyn Monroe! ¿Sorprendente?

El fenómeno del mundo pequeño no se limita al de los actores es, de hecho, una propiedad de toda red social. Un ejemplo adicional puede ayudar a clarificar esto. En el mundo de las matemáticas, Paul Erdős (Budapest 1913- Varsovia 1996) es todo un icono. Se trata del matemático más prolífico de todos los tiempos con cerca de 1 500 artículos científicos publicados, junto con 502 colaboradores inmediatos, es decir, los Erdős-1. El número Erdős máximo, hasta agotar la lista de todos los matemáticos que han publicado, es de 15, y el promedio es de 5. Posteriormente, se han ampliado los estudios sobre las bases de datos de todos los autores de la literatura científica, y se ha encontrado un número promedio muy pequeño que separa a dos autores científicos cualesquiera.

Esto quiere decir que el universo de los creadores académicos está muy bien conectado con una estructura de mundo pequeño, y esto garantiza un rápido y constante flujo de ideas, a pesar de que nadie lo

planeó así desde un inicio.

Las redes sociales, como hemos visto, son casos típicos de estructuras que no son totalmente regulares u ordenadas ni son tampoco estructuras totalmente desordenadas con conexiones al azar. Estas redes, que de hecho pertenecen a una familia de redes llamadas redes complejas, tienen una topología que las sitúa entre el orden y el desorden, y es por esto que llegan a tener propiedades muy peculiares. Otros ejemplos de redes complejas incluyen la red de internet, las cadenas tróficas, las redes neuronales del cerebro y, desde luego, las redes de conexiones sociales dentro de una organización. Lo anterior nos lleva de inmediato a pensar que la burocracia es la antítesis de la red compleja, por su ineficiencia y su distribución centralizada y jerárquica de las conexiones sociales, lo cual no tiene nada que ver con las propiedades de optimización de las redes complejas ni con sus propiedades de fractalidad, redundancia y robustez.

El efecto del mundo pequeño es un fenómeno que puede ayudar enormemente al entendimiento de la dinámica de redes sociales, es decir, a la comprensión de las estructuras y la dinámica de grupos y organizaciones. Lo anterior es de gran relevancia porque nos puede dar pautas sobre cómo estructurar cambios organizacionales para que la interacción entre sus miembros resulte en una mayor eficiencia global, concretamente cómo mejorar aspectos funcionales que se traduzcan en una disminución de la burocracia. La burocracia puede entenderse, a la luz del nuevo paradigma de redes, como una estructura de relaciones en la que no existen redundancia, autosemejanza ni, mucho menos, robustez, lo que significa que ha sido creada para favorecer ciertos nodos y jerarquías que no tienen ninguna relevancia para el fin por el cual la red fue creada inicialmente. Entender este punto puede aportar elementos clave para orientar las organizaciones hacia una mayor eficiencia y calidad.