

Cosas que pasan en un mundo de redes

Michele Catanzaro



Biografía. *Es licenciado en física por la Universidad de Roma Sapienza y doctor en física por la Universidad Politécnica de Cataluña. Ha publicado 11 artículos técnicos y ha sido ponente en 4 congresos internacionales. Así mismo, colabora como periodista free-lance con El Periódico de Catalunya, BarcelonaTV, Le Scienze y PhysicsWorld, entre otros medios. También se ocupa de la comunicación del ICFO-Instituto de Ciencias Fotónicas (Barcelona). Antes del Certamen Teresa Pinillos, su tarea divulgadora fue reconocida por un accésit del Premio Joan Oró de la Associació Catalana de Comunicació Científica, de la cual actualmente es vocal.*

Resumen. Los ecosistemas, las redes sociales en las que todos estamos inmersos, la manera en que se propagan las enfermedades y los virus informáticos, las infraestructuras humanas más importantes... por muy distintos que sean estos procesos, todos comparten dos características. Primero, describen dinámicas sorprendentes, imprevisibles, rapidísimas y que afectan a individuos, animales u objetos del todo independientes en apariencia. Segundo, estos fenómenos se desarrollan en redes: la red telefónica, el ecosistema, la red eléctrica, Internet, etc. No es de extrañar, por tanto, que en el último decenio se haya desarrollado una teoría científica aplicable a todos ellos: la llamada *teoría de las redes complejas*. Físicos, matemáticos, informáticos, biólogos, economistas y sociólogos han ido construyendo un marco teórico común que explica algunas de sus características. Los sorprendentes fenómenos que se desarrollan en los sistemas estructurados como redes -efectos dominó, correlaciones inesperadas entre elementos en apariencia independientes, pequeñas perturbaciones locales que generan efectos globales, gran velocidad de comunicación, etc.- parecen excepcionales e impredecibles. Sin embargo, es posible encontrar explicación a estas dinámicas si se tiene en cuenta la estructura del conjunto de interacciones en las que se desarrollan. Para entender las cosas que pasan en un mundo de redes, es crucial comprender la arquitectura escondida en sus conexiones.

Summary. Ecosystems, the social networks in which are all immersed, the way in which diseases spread and computer viruses, the most important human infrastructures... regardless of how different these processes are, they all share two characteristics: firstly, they describe surprising, unforeseeable, extremely rapid processes that affect seemingly independent individuals, animals or objects; secondly, these phenomena develop in networks: the telephone network, the ecosystem, the electricity grid, Internet, etc. It is therefore not surprising that in the last decade a scientific theory has been developed that can be applied to all of these networks: the so-called *theory of complex networks*. Physicists, mathematicians, computer scientists, biologists, economists and sociologists have gradually constructed a common theoretical framework that explains some characteristics of these networks. The surprising phenomena that develop in structured systems like networks - domino effects, unexpected correlations between apparently independent elements, small local interferences that have global effects, great speed in communications, etc. - seem exceptional and unpredictable. However, an explanation can be found for these processes taking into account the structure of all the interactions in which these networks develop. To understand everything that happens in a world of networks, it is essential to understand the architecture hidden in its connections.

Résumé. Les écosystèmes, les réseaux sociaux dans lesquels nous sommes tous plongés, la manière dont se propagent les maladies et les virus informatiques, les infrastructures humaines les plus importantes... ces processus ont beau être très différents, ils partagent tous deux caractéristiques. D'abord, ils décrivent des dynamiques surprenantes, imprévisibles, très rapides, concernant les individus, animaux ou objets apparemment tout à fait indépendants. Deuxièmement, ces phénomènes se développent en réseaux : le réseau téléphonique, l'écosystème, le réseau électrique, Internet, etc. Il n'est pas étonnant, par conséquent, que cette dernière décennie, une théorie scientifique applicable à eux tous se soit développée : ladite *théorie des réseaux complexes*. Les physiciens, mathématiciens, informaticiens, biologistes, économistes et sociologues ont construit un cadre théorique commun qui explique quelques-unes de ses caractéristiques. Les phénomènes surprenants qui se développent dans les systèmes structurés comme les réseaux - effets domino, corrélations inattendues entre des éléments en apparence indépendants, petites perturbations locales qui produisent des effets globaux, une grande vitesse de communication, etc. - semblent exceptionnels et difficiles à prévoir. Toutefois, il est possible de trouver une explication à ces dynamiques si l'on tient compte de la structure de l'ensemble des interactions dans lesquelles elles se développent. Pour comprendre les choses qui se passent dans un monde de réseaux, il est crucial de comprendre l'architecture maquillée dans ses connexions.



« ¿Aznar de rositas? ¿La llaman jornada de reflexión y Urdazi trabaja? Hoy 13M, a las 18h., sede PP C/Génova, 13. Sin partidos. Silencio por la verdad. ¡Pásalo!». El 13 de marzo de 2003 decenas de miles de mensajes como éste rebotaron en decenas de miles de móviles españoles. Por la tarde, se formaron manifestaciones en distintas ciudades del país: la red de telefonía móvil mostró un poder de convocatoria del todo inesperado. Otros muchos factores jugaron un papel en esa ocasión, sin embargo, el episodio puso en evidencia las sorpresas que pueden reservar los sistemas que tienen estructura de redes.

Efectivamente, hay muchos ejemplos de fenómenos sorprendentes que se han dado en sistemas conectados. A principios del siglo XX, las nutrias marinas de la costa californiana habían casi desaparecido: la caza por su preciada piel las había exterminado. En 1911, el gobierno norteamericano decidió prohibirla. Esta decisión desencadenó un verdadero efecto dominó. Las nutrias volvieron a proliferar y a alimentarse de erizos de mar. La población de erizos menguó y esto implicó un mayor crecimiento de las algas, muy apreciadas por los erizos. Con la renovada abundancia de algas, aumentó la disponibilidad de comida para todos los peces e incluso se registró una reducción de la erosión costanera. En este caso, los ecólogos pudieron reconstruir la cadena de causas y efectos que generó la sorprendente secuencia de hechos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, esto no se consigue fácilmente. En los años ochenta, la población de bacalaos del Atlántico Norte empezó a declinar, poniendo en crisis la industria pesquera canadiense. El gobierno de Canadá culpó a las focas, por ser depredadoras de bacalaos. Hasta mediados de los años noventa, se autorizó el exterminio de casi medio millón de focas. Sin embargo, los bacalaos siguieron menguando. A finales de los noventa, el ecólogo Peter Yodzis, de la Universidad de Guelph (Canadá) comprobó que existen diez millones de distintas cadenas alimentarias que conectan la foca al bacalao. Si se dibujan todas, se obtiene una madeja densa e intrincada en la cual las cadenas se cruzan y se bifurcan (Fig. 1). La estructura del ecosistema es la de una red y prever los fenómenos que se desarrollan en ella no es nada fácil.

No sólo el ecosistema sino también las infraestructuras humanas más importantes tienen forma de red. En septiembre de 2003, un apagón dejó toda la península italiana sin electricidad durante horas. Según las investigaciones, el incidente se debió a la interrupción de una sola línea de alta tensión por la caída de un árbol en Suiza. En enero de 2003, el virus informático *SQL Slammer* se difundió en Internet: en solo diez minutos afectó a decenas de miles de servidores. En consecuencia, cajeros automáticos, sistemas de emergencia de bomberos e incluso sistemas de control de vuelo registraron disfunciones durante unas horas. En 1996, el servidor de correo electrónico *Hotmail* tenía alrededor de un millón de clientes. Un año y medio después, el número era de doce millones. Una de las claves de éste éxito fue aprovechar la red de intercambio de correos electrónicos: el servidor introducía automáticamente en todos los mensajes un enlace que los receptores podían utilizar para darse de alta de una cuenta de *Hotmail*.

Todos estos ejemplos comparten dos características. Primero, se trata de dinámicas sorprendentes, imprevisibles, rapidísimas y que afectan individuos, animales u objetos del todo independientes en apariencia. Segundo, estos fenómenos tienen lugar en redes (la red telefónica, el ecosistema, la red eléctrica, Internet, etc.). Por muy distintos que sean estos procesos, durante el último decenio se ha desarrollado un punto de vista unitario sobre ellos: la llamada *teoría de las redes complejas*. Físicos, matemáticos, informáticos, biólogos, economistas y sociólogos han ido construyendo un marco teórico

común que explica algunas de las características de estos fenómenos. En los últimos años, los investigadores han revelado que la estructura de las interacciones que vertebran las redes es fundamental para entender las dinámicas que se desarrollan en ellas.

Las primeras observaciones en este campo se remontan a 1967. Entonces, el psicólogo Stanley Milgram, de la Universidad de Harvard, llevó a cabo un experimento que tiene mucho que ver con esas experiencias que a uno le hacen exclamar «¡El mundo es un pañuelo!»; por ejemplo, cuando en una fiesta se descubre que un desconocido es en realidad amigo de un amigo. Milgram envió más de 150 cartas a ciudadanos americanos escogidos al azar. Les pedía que reenviaran esas cartas a un ciudadano de Boston, del cual daba el nombre, pero no la dirección. Los participantes en el experimento tenían que enviar las cartas a algún conocido suyo, que por alguna razón les pareciera *cercano* al destinatario. En un país de centenares de millones de habitantes, la empresa parecía desesperada. Pero al cabo de unos días el destinatario de Boston empezó a recibir las primeras cartas. Cuando el experimento se dio por acabado, más de la mitad de las cartas habían llegado a su destino, pasando por un promedio de seis intermediarios.

El descubrimiento de los *seis grados de separación* fue tan desconcertante que caló en la cultura popular e incluso llegó a inspirar una obra de teatro, de John Guare. Sin embargo, no se acabó de entender hasta 1998 cuando, el sociólogo Duncan Watts, de la Universidad de Columbia, y el matemático Steven Strogatz, de la Universidad de Cornell, reconstruyeron en el ordenador un modelo ficticio de las relaciones que podían unir a los participantes en el experimento. Era una parrilla ordenada en la cual cada individuo estaba conectado con un cierto número de amigos de su entorno. Sin embargo, en este modelo, el número de conexiones entre dos individuos era en la mayoría de los casos enormemente grande. Entonces, Watts y Strogatz, sustituyeron algunas de las conexiones por enlaces a individuos alejados, escogidos al azar (personas conocidas por casualidad, amigos emigrados, etc.). Sorprendentemente, una fracción muy pequeña de conexiones de este tipo era suficiente para que la separación entre dos individuos cualesquiera se volviera en promedio muy pequeña: les separaban unas pocas conexiones (no necesariamente seis), aunque hubiera millones de individuos. Era suficiente con intercambiar una parrilla ordenada con una red de relaciones para que todos los individuos se volvieran increíblemente cercanos los unos a los otros. Las redes son *mundos pequeños*, concluyeron Watts y Strogatz: las cartas del experimento de Milgram llegaron a su destino tan rápidamente y por tan pocos intermediarios porque las relaciones sociales tienen estructura de red. Lo mismo pasa en otros sistemas con arquitectura de red. La extinción de una especie afecta a otras muchas en el ecosistema aunque parezcan del todo independientes de la primera; en realidad, una corta cadena alimentaria conecta cada especie con cualquier otra. La rapidez es una propiedad de los fenómenos que tienen lugar en *mundos pequeños*: la información o los virus alcanzan a toda velocidad la mayoría de los elementos de una red ya que todos ellos están a poquísimas conexiones de distancia de la fuente.

Otro aspecto del experimento de Milgram no recibió inicialmente mucha atención: dos terceras partes de las cartas recibidas por el destinatario de Boston le fueron entregadas por una única persona, un conocido suyo que se llamaba Mr. Jacobs. La mayoría de las cadenas que llevaban al destinatario pasaban por esta persona. A veces, en las revistas de los aviones se encuentra un mapa con líneas que indican los trayectos de los vuelos y muchas de ellas pasan por grandes aeropuertos, como Frankfurt o París. Gracias a sus numerosos contactos sociales, Mr. Jacobs debía de jugar en la red social del destinatario de Boston un

papel parecido al jugado por estos aeropuertos en la red de los vuelos. Este hecho fue ignorado hasta finales de los años noventa. Entonces, empezaron a aparecer los primeros mapas de Internet. La red había crecido desmesuradamente, sin ninguna autoridad central que hubiera dibujado su arquitectura y con una gran libertad de añadir cables y máquinas: nadie conocía exactamente su estructura. Los mapas revelaron una enorme *heterogeneidad* en la conectividad. El equipo con más conexiones tiene miles de enlaces más que el menos conectado: como en el experimento de Milgram o en la red de los vuelos, también en Internet hay unos *superconectores* que juegan el mismo papel que Mr. Jacobs o que el aeropuerto de Frankfurt. Esta observación atrajo la atención de muchos investigadores, que encontraron situaciones parecidas en otros sistemas estructurados como redes. En las redes ecológicas hay especies-clave que alimentan un gran número de animales. En las redes profesionales hay personas con muchos contactos (por ejemplo, científicos que colaboran con muchos investigadores o directivos que interactúan con muchos colegas). En las redes de interacciones sexuales, hay individuos con un número muy grande de relaciones (por ejemplo, las trabajadoras del sexo). En la red de interacciones químicas entre las sustancias de una célula, hay moléculas (como el ATP) que interactúan con otras muchas.

La presencia de esta propiedad sorprendió mucho a los científicos. En el modelo de Watts y Strogatz la conectividad resulta ser muy *homogénea*: todos los elementos de la red tienen más o menos el mismo número de conexiones; el número de enlaces medio proporciona la *escala*, el *orden de magnitud* de la conectividad de los elementos. Por el contrario, en las redes del mundo real hay elementos con conectividades muy alejadas del promedio: por esta razón, se dice que las redes reales son *libres de escala*. Muchos investigadores han intentado comprender el origen de esta propiedad. Una de las hipótesis más acreditadas se debe a los físicos Albert Laszlo Barábasi y Reka Albert, de la Universidad de Notre Dame (E.U.A.). Los dos se fijaron en que las nuevas unidades que entran a formar parte de ciertas redes se conectan preferentemente con elementos que ya tengan muchas conexiones. Por ejemplo, una nueva web apuntará más fácilmente a otra que ya tiene muchos enlaces (por ejemplo, la de un periódico) que a una muy poco conectada (por ejemplo, una página personal). En 1999, Barábasi y Albert simularon en el ordenador el crecimiento de una red según esta sencilla regla y obtuvieron una estructura con conectividad heterogénea. Es improbable que esta regla explique la heterogeneidad de todas las redes. Sin embargo, el de Barábasi y Albert fue el primero de una serie de modelos que explican esta propiedad en base a reglas relativamente sencillas.

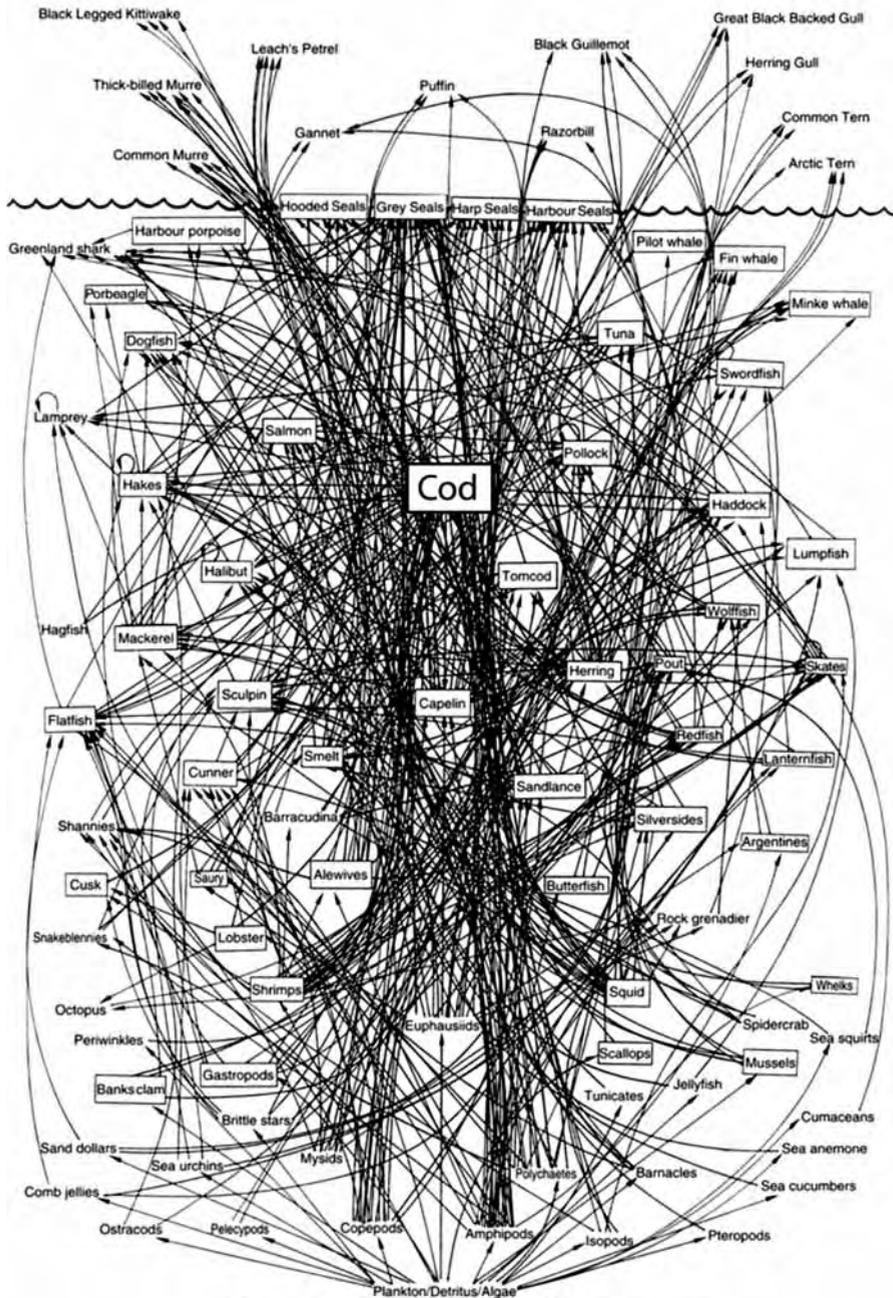
La *libertad de escala* de las redes reales, así como el hecho de ser *mundos pequeños*, explica algunas de las características más sorprendentes de las dinámicas que tienen a esas redes como escenario. Muchos de estos procesos se pueden asimilar a la difusión de una epidemia. Enfermedades como el SIDA se difunden en la red de las relaciones sexuales no protegidas. Pero también la propagación de virus informáticos en Internet o de mensajes en la red de móviles o de misivas en la red de correos electrónicos se pueden imaginar como la difusión de una epidemia. La Peste Negra se difundió a mitad del siglo XIV cruzando Europa del sur al norte durante cuatro años, como una oleada. Al contrario, los datos de la SARS o de la gripe aviar dibujan una imagen más parecida a un incendio: la epidemia brota en Asia pero al cabo de pocos días una *chispa* llega hasta la otra punta del planeta. La diferencia está en el hecho que las nuevas pandemias disponen de un poderoso medio de difusión: el mundo pequeño y superconectado de la red aérea.

A partir de 2001, los físicos Romualdo Pastor-Satorras, de la Universidad Politécnica de Cataluña, y Alessandro Vespignani, de la Universidad de París Sud, junto con sus equipos, han desarrollado un conjunto de modelos matemáticos para simular el desarrollo de epidemias en redes. En primer lugar, reconstruyeron en el ordenador una red de relaciones sociales entre individuos y estudiaron qué pasa si se introduce una fracción de individuos enfermos y se deja que infecten a otros por medio de sus contactos sociales. Simularon esta situación variando la *tasa de difusión* de la epidemia, un parámetro que incluye muchos aspectos como la virulencia de la infección, la resistencia de los individuos, etc. Las campañas de vacunación y otras actuaciones médicas se traducen en una reducción de la tasa de difusión.

Cuando la epidemia se simulaba en una red con conectividad homogénea, se podía encontrar siempre un umbral de la tasa de difusión por debajo del cual la epidemia desaparecía rápidamente. Al contrario, por encima de este umbral la enfermedad se volvía endémica y un porcentaje de la población quedaba siempre infectado. Cuando, por otro lado, la epidemia se simulaba en una red heterogénea (como las reales) el umbral era mucho más bajo: por mucho que la tasa de difusión se bajara, siempre quedaban algunos individuos infectados. Estudiando la dinámica al detalle, Pastor-Satorras y Vespignani descubrieron que este comportamiento desconcertante se debía justamente a la presencia de superconectores. Estos individuos, al estar en contacto con muchos otros, se infectan fácilmente y, una vez infectados, pueden pasar el virus a muchos de sus vecinos.

Por esta razón, los virus siempre están en circulación en una red con superconectores; aunque sus tasas de difusión se reduzcan, es suficiente con que infecten a un superconector para volver a difundirse por la red. Como en el caso del Mr. Jacobs del experimento de Milgram, buena parte de la dinámica depende de la presencia de superconectores. Esto explica, por ejemplo, por qué virus informáticos detectados hace años siguen circulando, a pesar de la difusión de antivirus. Si imaginamos la propagación de información como si fuera la difusión de un virus en una red, los resultados de Vespignani y Pastor-Satorras explicarían también porqué a menudo la información sigue circulando a pesar de la más férrea censura, o bien porque leyendas infundadas persisten años después de haber sido desmentidas. Recientemente, Vespignani ha desarrollado modelos realistas de la difusión de pandemias a escala global por medio de la red de las conexiones aéreas y ha llegado incluso a formular predicciones sobre el posible número de bajas en las principales ciudades del mundo en el caso que brotara una pandemia de gripe aviar.

La modelización de epidemias es uno de los resultados más fascinantes de la *teoría de las redes complejas*. Esta línea de investigación intenta reproducir en el lenguaje de las matemáticas y de la simulación informática los sorprendentes fenómenos que se desarrollan en sistemas estructurados como redes: efectos dominó, correlaciones inesperadas entre elementos en apariencia independientes, pequeñas perturbaciones locales que generan efectos globales, gran velocidad de comunicación, etc. Estas características parecen excepcionales e impredecibles. Sin embargo, es posible encontrar explicación a estas dinámicas si se tiene en cuenta la estructura del conjunto de interacciones en las que se desarrollan. Para entender las cosas que pasan en un mundo de redes, es crucial comprender la arquitectura escondida de sus conexiones.



A simplified food web for the Northwest Atlantic. © IMMA

Fig. 1. Reconstrucción parcial de la red ecológica del Océano Atlántico en la costa de Canadá. Las flechas van de predador a presa. Los rectángulos marcan las especies explotadas también por los humanos (cod = bacalao, seal = foca). Por cortesía de D. Lavigne.

Bibliografía y fuentes de información

- [1] M. Buchanan. *Nexus: Small Worlds and the Groundbreaking Theory of Networks*. W. W. Norton & Co., New York, 2003.
- [2] S. Milgram. The small world problem. *Psychology Today*, 2: 60-67, 1967.
- [3] D. J. Watts & S. H. Strogatz. Collective dynamics of small-world networks. *Nature*, 393: 440-442, 1998.
- [4] A. L. Barabási & R. Albert. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286: 509-511, 1999.
- [5] V. Colizza, A. Barrat, M. Barthelemy & A. Vespignani. Prediction and predictability of global epidemics: the role of the airline transport network. *PNAS*, 103: 2015-2020, 2006.

