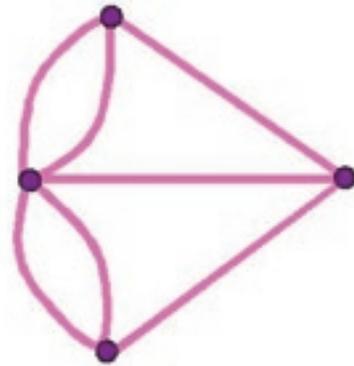
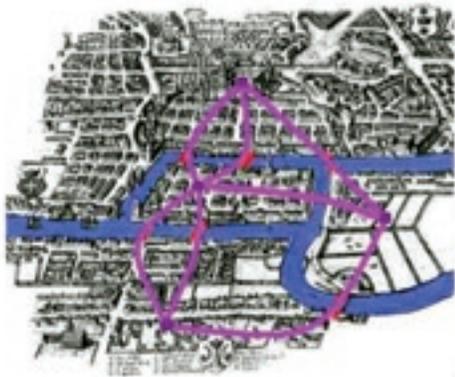


¿UNA NUEVA CIENCIA?

Arturo C Martí | Marcelo Ponce C

Investigadores*



Esquema de Königsberg y sus siete puentes (izquierda), los cuales pueden interpretarse como un grafo (derecha).

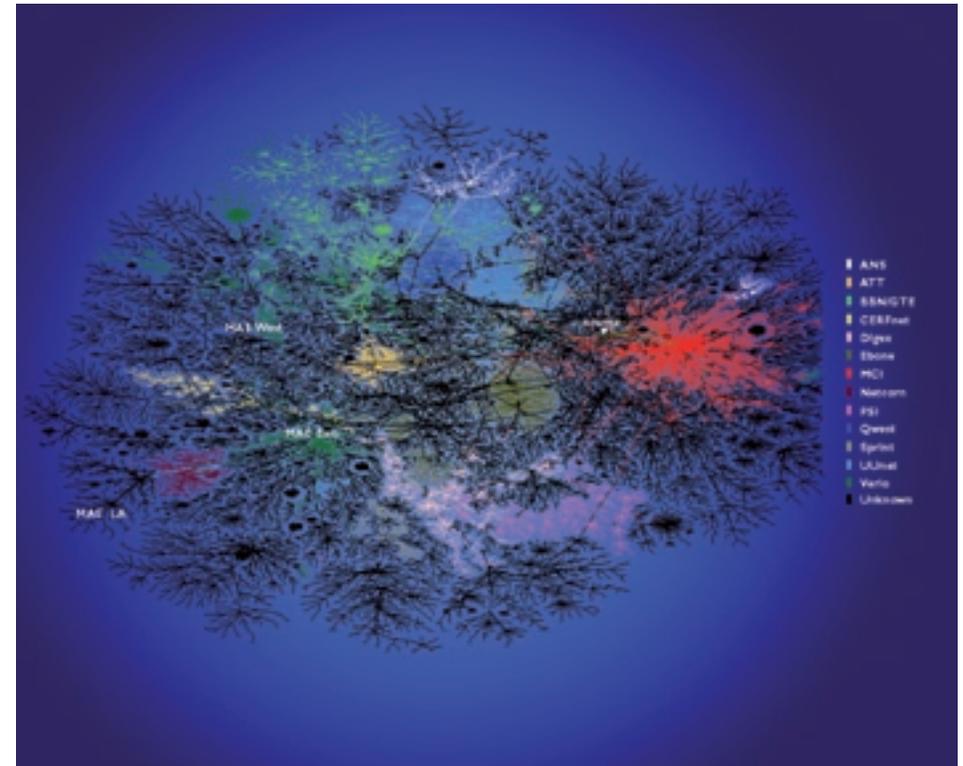
¿Qué tienen en común Internet y el genoma de un gusano? ¿O la lingüística y las redes de distribución eléctrica? ¿Hay alguna relación entre el cine y la forma en que trabajan los científicos? En los últimos años se ha encontrado que un conjunto de estructuras presentes en ámbitos completamente diferentes presentan propiedades comunes. Estas estructuras se denominan «redes complejas» y sus características han sido estudiadas intensamente en los últimos años.

LOS ORÍGENES

Leonhard Euler (Basilea 1707- San Petersburgo 1783) fue uno de los grandes matemáticos que recuerda la historia, además de hacer aportes fundamentales en los campos de la óptica, la mecánica y la astronomía. Durante su vida escribió cientos de artículos científicos abarcando una infinidad de temas (sus obras completas ocupan 86 volúmenes).

En 1736 residía en Königsberg, ciudad perteneciente por ese entonces a Prusia y que actualmente es parte de la Federación Rusa. Atraviesa esta ciudad el río Pregel, que justamente en el centro de ella forma dos islas.

* Instituto de Física, Facultad de Ciencias. Universidad de la República.



Representación simbólica de Internet, los diferentes colores corresponden a los grandes proveedores de acceso a la red (realizada por K C Claffy).

En ese entonces, siete puentes unían las dos orillas del río y las islas.

Este hecho inspiraba un antiguo acertijo entre los lugareños: ¿sería posible dar un paseo, empezando por un lugar cualquiera, y recorrer las cuatro partes de tierra firme (las dos orillas y las dos islas) cruzando todos los puentes una sola vez y volver al punto de partida?

Euler estudió meticulosamente este problema, asignó un punto a cada sector de tierra firme y en los casos en que dos sectores estaban unidos por puentes los unió con segmentos. Luego estudió las diferentes formas de recorrer todo el dibujo terminando en el mismo punto del que había partido sin pasar dos veces por el mismo lugar.

Seguramente el lector habrá encontrado problemas similares en revistas de entreteni-

mientos; por lo común el desafío es trazar una figura dada sobre el papel sin levantar el lápiz y sin repasar ninguna línea. Si es afecto a esta clase de entretenimientos le damos aquí el resultado al que llegó Euler. El problema tiene solución sólo si el número de puntos a donde llega un número impar de enlaces es cero o dos. En este último caso debemos escoger como sitio de partida uno de estos puntos y finalizar en el otro. En el caso de los puentes de Königsberg, siguiendo el razonamiento de Euler, deducimos fácilmente que no existe solución. Este inocente problema, además de alterar los hábitos recreativos de los habitantes de la ciudad, dio lugar al nacimiento de una nueva disciplina matemática: la «teoría de grafos». Ésta estudia las propiedades de los grafos, que son objetos formados por vértices (o nodos) conectados por líneas llamadas aristas (o enlaces).

OTRO GRAN MATEMÁTICO Y LAS REDES ALEATORIAS

Dos siglos después, Paul Erdős, matemático de origen húngaro que como Euler se caracterizó por su colosal productividad, volvió a ocuparse del asunto. No le interesaba ninguna de las cuestiones que suelen preocupar al resto de los mortales, tales como el arte, el deporte, las amistades, el sexo o los bienes materiales (sus pertenencias se limitaban a poco más de lo que llevaba puesto), pero sí visitaba incansablemente a sus colegas matemáticos en busca de nuevos y desafiantes problemas. «Mi cerebro está abierto», exclamaba, mientras atacaba —y generalmente resolvía— todos los problemas que se le planteaban. Cuando se agotaban los que su anfitrión proponía, se marchaba en busca de nuevos horizontes con más problemas a resolver.

Erdős, junto con el matemático también de origen húngaro Alfréd Rényi, en la década de 1960 estudiaron los grafos formados aleatoriamente. Esencialmente consideraron grandes conjuntos de nodos donde los enlaces se distribuían completamente al azar. Sus trabajos son considerados fundacionales de los actuales estudios sobre las redes complejas.

QUÉ PEQUEÑO ES EL MUNDO

El psicólogo estadounidense Stanley Milgram (1933-1984) es bien conocido por su controvertido experimento —posteriormente llevado al cine— acerca de la obediencia a la autoridad. Con él se propuso determinar hasta qué punto un participante voluntario estaba dispuesto a obedecer las órdenes de una autoridad aun cuando éstas pudiesen entrar en conflicto con su conciencia u ocasionar daños a un tercero.

En otro de sus experimentos, este sí relacionado con el tema que tratamos aquí, se propuso determinar qué distancia separaba a dos personas cualesquiera en su país. A Milgram no le interesaba la distancia en términos de kilómetros sino en cuanto a vínculos: cuántos conocidos son necesarios para unir a dos individuos comunes y corrientes. Para

averiguarlo escogió a dos personas de su confianza, completamente anónimas, que vivían cerca de Boston, como destinatarios finales. Envío luego cartas a ciudadanos escogidos al azar, de lugares remotos, en su mayoría residentes en los estados de Nebraska y Kansas. En estas misivas solicitaba que las mismas fueran entregadas, en caso de conocerlo directamente, al destinatario final, pero si les era desconocido pedía que las enviaran a otra persona que estimasen tuviera más posibilidades de conocerlo. Esta persona tendría que hacer lo mismo, y así sucesivamente hasta que las cartas llegaran al destinatario final.

Sorpresivamente, al poco tiempo encontró que la mayoría de las cartas llegaba a destino, y en promedio se habían necesitado sólo seis intermediarios para alcanzar al destinatario final. Esta experiencia inspiró la exitosa obra teatral *Seis grados de separación*, de John Guare.

En el lenguaje de la teoría de grafos, podemos decir que cada persona es un nodo y está conectada por enlaces a las personas con las que tiene amistad. El experimento de Milgram, e infinidad de otros posteriores realizados en Internet, indican que los «seis grados de separación» son una buena aproximación a la distancia vincular entre dos personas cualesquiera, por ejemplo el lector y un esquimal o un habitante de las montañas de Nepal.

Si estudiásemos la distancia entre dos uruguayos seguramente encontraríamos que es cercana a dos, pues es muy corriente que dos uruguayos que recién se conocen y se ponen a conversar encuentren un conocido común.

Recientemente, en 1998, los científicos Duncan Watts y Steven Strogatz publicaron un trabajo en la prestigiosa revista *Nature* comunicando el resultado de sus estudios sobre el «efecto pequeño mundo», y propusieron una forma de construir una red compleja que tiene, entre otras, la propiedad de «pequeño mundo». Este modelo, conocido actualmente como WS por las iniciales de sus creadores, combina redes completamente ordenadas con las redes aleatorias de Erdős y Rényi.



Tráfico de Internet ponderado de acuerdo al volumen de información (creación gráfica de Stephen G Eick).

En su ya famoso trabajo, Watts y Strogatz estudian sistemáticamente algunas redes complejas formadas por actores de cine, la distribución de potencia eléctrica, y el genoma del pequeño gusano *C elegans*. En el primer ejemplo los nodos son los actores, y dos actores están unidos si participaron en al menos una película en común. La segunda red está relacionada con la distribución eléctrica, los nodos son los generadores, transformadores y subestaciones, y los vértices coinciden con las líneas de transmisión. Finalmente, el pequeño nematodo *C elegans*, caracterizado por su simplicidad, fue el primer organismo del cual se secuenció su código genético. En este caso se formó una red donde los nodos son neuronas y hay una unión si dos neuronas tienen establecida una sinapsis.

LA DISTRIBUCIÓN DE LA RIQUEZA Y LAS REDES COMPLEJAS

Un tópico muy estudiado ha sido la cantidad de enlaces que tiene cada nodo, también denominado distribución de enlaces. Se comprobó que en la mayoría de las redes complejas los nodos se distribuyen en forma muy poco equitativa. Es decir, hay unos pocos nodos con muchos enlaces y muchos nodos con pocos enlaces. Esto sucede tanto en Internet como en las redes sociales, en las redes de distribución eléctrica y en las redes neuronales. Esta distribución, denominada ley de potencias, es similar a la distribución de riqueza en el mundo: hay unos pocos muy ricos, y un número enorme de gente carece de recursos. Esta es una propiedad frecuentemente observada en las redes complejas.



Representación abstracta de una red compleja cuya distribución de enlaces sigue una ley de potencias. Se aprecian muchos nodos con muy pocos enlaces y unos pocos nodos con muchos enlaces.

¿POR QUÉ ES IMPORTANTE ESTUDIAR LAS REDES COMPLEJAS?

Un conglomerado de agentes o unidades interactuantes usualmente compone un sistema complejo, y éste presenta propiedades que no tienen las unidades que lo forman tomadas individualmente. Tales agrupamientos son un ejemplo del paradigma que persiguen los sistemas complejos: la interacción de diferentes elementos da lugar a nuevos comportamientos que no es posible explicar mediante la mera combinación de las partes, sino que surge un nuevo fenómeno colectivo. Estos sistemas permiten explicar una amplia variedad de fenómenos en biología, física y química, entre otros. En particular en ciertas ocasiones la propiedad emergente es una oscilación sincronizada. Algunos ejemplos son el marcapasos de la actividad de las células cardíacas, impulsos eléctricos en células nerviosas de la corteza cerebral, ritmos circadianos, la emisión al unísono de destellos luminosos por poblaciones de luciérnagas, y muchos otros ejemplos en la naturaleza e incluso más técnicos.

Tradicionalmente estos sistemas han sido estudiados mediante modelos que intentan reflejar cada vez más la complejidad particular del caso estudiado. Originalmente los modelos incluían información acerca del sistema que se intentaba modelar y de la interacción en sí. Un elemento esencial a la hora de tener en cuenta situaciones realistas es lo que consideramos el efecto de las interacciones retardadas que surgen de considerar tiempos de comunicación finitos entre las unidades. La observación de tales condiciones ha permitido que por primera vez se puedan explicar ciertos comportamientos que de otra forma no se podrían entender.

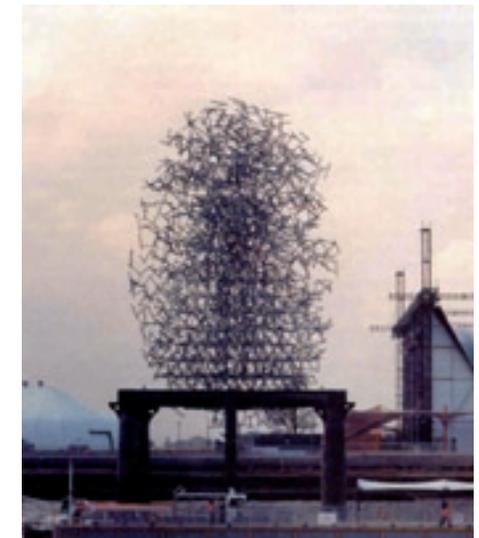
Actualmente es bien conocido el hecho de que agentes que interactúan con distintos tiempos de respuesta pueden sincronizar su intercomunicación, pero la comprensión del rol que juega la forma de conexión entre las unidades y de los tiempos de respuesta entre las mismas es un campo de activa investigación. La aparición de nuevos modelos que permitan comprender cómo surgen estos comporta-

EJEMPLOS CERCANOS DE REDES COMPLEJAS.

- Los orígenes de Internet se remontan a la década de 1960, cuando algunos organismos de seguridad de Estados Unidos buscaban diseñar un sistema de comunicación descentralizado y resistente a ataques. Y si bien nuestra familiaridad y dependencia de la web no nos deja percibirlo, ella es un ejemplo paradigmático de red compleja. Las diferentes piezas de hardware son aquí los nodos, unidos por un cable, una fibra o un enlace inalámbrico.
- Los aeropuertos funcionan como nodos de los vuelos (enlaces) que conectan a los viajeros con sus destinos.
- Los científicos de todo el mundo trabajan en redes produciendo todos los años miles de trabajos que son indexados en grandes bases de datos. Estas bases también han sido estudiadas en detalle.
- Muchos compuestos orgánicos, e incluso reacciones que llegan a establecer un cierto equilibrio, pueden visualizarse como redes donde los elementos son los nodos, y las reacciones que se establecen entre ellos representan los enlaces o conexiones (otro ejemplo de esto podrían ser las redes metabólicas). Las redes tróficas establecidas entre las especies de ciertos ambientes son otro claro caso de redes complejas.

mientos colectivos es fundamental no sólo para entenderlos sino también para poder prever y anticipar efectos indeseados.

Como ejemplos de aplicación de lo anterior podemos nombrar los estudios sobre la propagación de epidemias en distintas especies animales —incluyendo a los humanos—, o la investigación de las redes tróficas que sustentan la dinámica de las distintas especies de cierto ecosistema. También en casos de fallas sucesivas en las redes eléctricas (apagones) es posible modelar esta «sincronización» con un diseño de red compleja que permita detectar los puntos más vulnerables de esas redes y ensayar el efecto resultante de eliminar ciertos nodos estratégicamente (ataques) o en forma aleatoria (fallas), pudiendo desarrollar una estructura mejor u otra manera de conectar las redes para hacerlas más robustas y tolerantes. ■



Representación escultórica de una red compleja.

«Cuando tú estés dispuesta / comeremos / un pedazo de manzana en automóvil / y cuando regresemos / de una higuera recogeremos higos / y alimentaremos a gorriones vagabundos / cuando tú estés dispuesta / se sobrentiende.»

Extracto de *Cuando tú estés dispuesta*, de Humberto Megget.