

#NODOS

Gustavo Ariel Schwartz

Víctor E. Bermúdez

Editores

Editores

Gustavo Ariel Schwartz

Centro de Física de Materiales (CSIC – UPV/EHU)
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Donostia International Physics Center

Víctor E. Bermúdez

Facultad de Filología
Universidad de Salamanca
Donostia International Physics Center

Mestizajes



Prefacio

Este no es un libro sobre ciencia, ni sobre arte, literatura o humanidades; o quizás sea todo eso a la vez. Se trata de un libro inclasificable que se resiste a las categorizaciones porque la realidad y el pensamiento no admiten compartimentos estancos. Este libro propone una aventura intelectual: la exploración de las fronteras entre los diferentes ámbitos del conocimiento. Propone una colaboración intensa entre disciplinas, una manera distinta de indagar en la realidad que nos permita abordar de manera apropiada problemas complejos como la memoria, el origen de la vida o la conciencia.

La realidad es más compleja y está más interconectada de lo que podríamos habernos imaginado. Hoy resulta imposible una comprensión cabal del lenguaje sin recurrir a las redes complejas, o estudiar la emoción sin tener en cuenta la memoria o entender el conocimiento científico sin acudir a la metáfora. El conocimiento transdisciplinar no es una curiosidad ni una moda, sino una necesidad: la de contar con herramientas apropiadas para afrontar las cuestiones fundamentales que atañen a la condición humana.

Desde la materia más elemental hasta la conciencia, pasando por la sorprendente complejidad de los seres vivos, las grandes preguntas a las que siempre nos hemos enfrentado: ¿cómo surge la vida?, ¿qué es la conciencia? o ¿cómo puede el caos suscitar orden? requieren un enfoque que permita idear nuevas formas de abordarlas. Buscamos por lo tanto alentar un intercambio de ideas que acerque las posturas de las diferentes disciplinas, encontrar puntos de afinidad y establecer estrategias que permitan aproximaciones conjuntas a problemáticas cuya complejidad invita a reestructurar su estudio de un modo inter o transdisciplinar.

#Nodos ofrece un recorrido dinámico por noventa planteamientos híbridos que atraviesan diez núcleos temáticos en pleno desarrollo. Temas como redes complejas, metáfora, cosmos, caos y complejidad, emergencia, percepción, memoria, emoción, conciencia y *big data* abarcan una región significativa del saber y representan

problemas suficientemente complejos como para alentar un abordaje transdisciplinar. Para ello hemos reunido las colaboraciones de científicos, escritores, artistas y humanistas de diversas disciplinas y países con el propósito de estimular nuevas preguntas desde todas las orillas del conocimiento.

Algunas veces las disciplinas se contagian, otras en cambio se repelen, pero el contacto entre ellas es necesario cuando no imprescindible. En muchos casos, los colaboradores de este libro adoptan etiquetas apenas transitorias. Sus ideas o sus creaciones no encuentran recipientes lo suficientemente elásticos. Hay químicos poetas, artistas en laboratorios, físicos devenidos en lingüistas y neurocientíficos haciendo filosofía. No caben en las categorías. Ello ha supuesto, en primer lugar, el desafío de lograr una comunicación fluida que organice esta heterogeneidad; pero abrir caminos nuevos implica también modificar y expandir las prácticas que se llevan a cabo en cada ámbito. Articular concepciones dispares, cuando no antagónicas, de lo que un problema es y de cómo debe resolverse ha exigido armonizar diversas actitudes ante el conocimiento. Poner en sintonía las diferentes perspectivas ha requerido, además, aprender a escuchar a quienes conciben el mundo de modo distinto y dar importancia a todo tipo de énfasis, matices y sensibilidades que acercan o distancian las miradas científicas, artísticas, humanistas o literarias.

Del contacto entre disciplinas se derivan contagios, resistencias, paralelismos y reformulaciones que nutren todos los ámbitos del saber. Creemos que hay una riqueza en la articulación misma, en la combinación, cuando el conocimiento surge como una suma de recursos de las distintas disciplinas que interactúan en torno a un objeto de estudio. Sin embargo, para que esta riqueza sea fructífera es imprescindible comprender la naturaleza de las relaciones que atraviesan los ámbitos del saber y acrecentar su potencial transdisciplinar. Poner en sintonía ideas, inquietudes y métodos distintos en torno a problemas compartidos demanda proponer soluciones a desafíos de naturaleza muy diversa. Pero el resultado no puede ser solo la suma de las partes: el contacto fructífero debe conllevar un giro de algún modo imprevisto, algo imposible sin su acercamiento. Ese es el sentido de la relación.

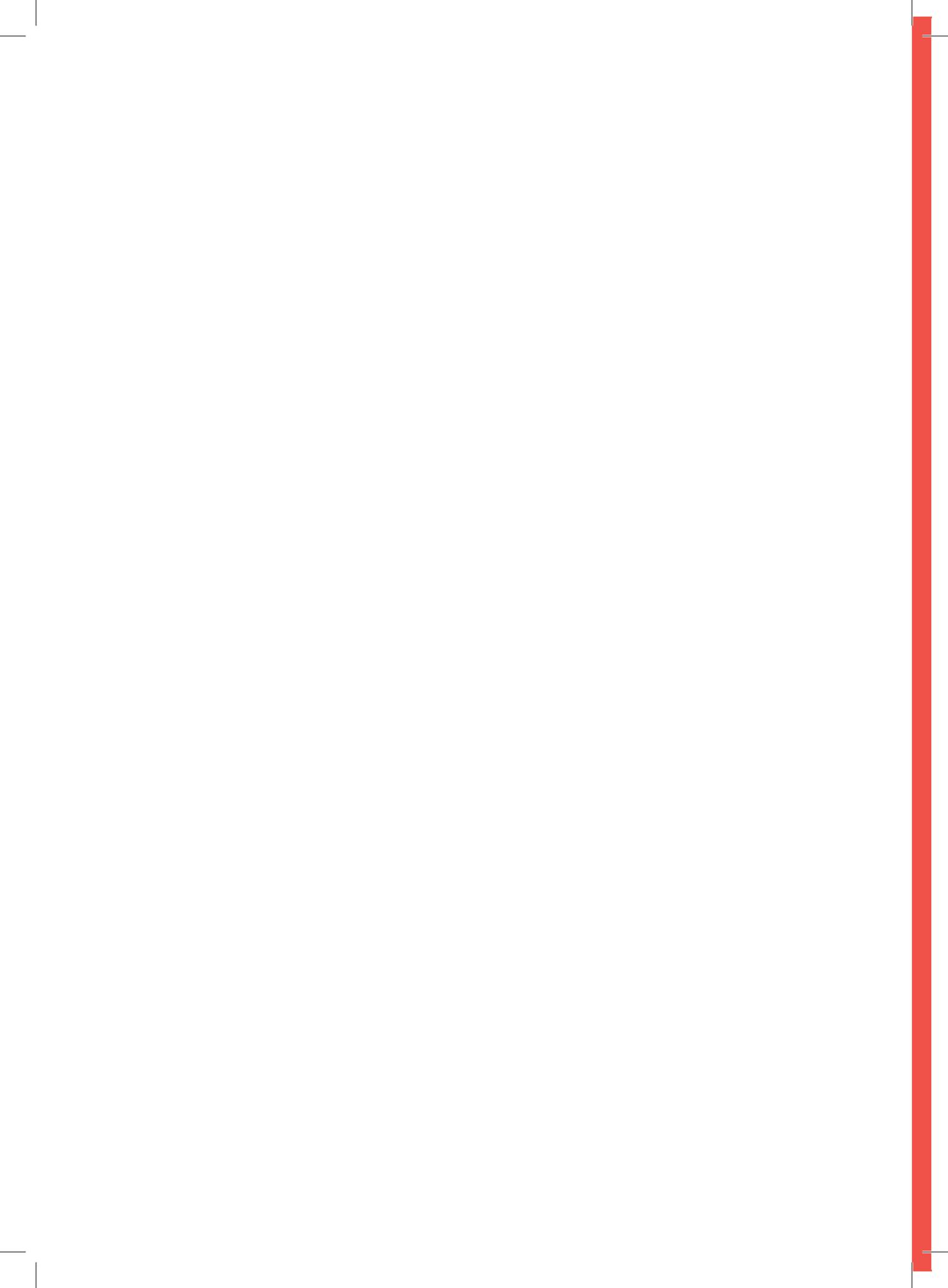
A su manera, este libro es muchos libros. A gusto de intuiciones, los siguientes nodos pueden ser leídos de manera lineal o alternada, o uno a uno, atravesando o saltando entre sus enlaces explícitos o no. Pueden ser abandonados cuando el lector quiera, retomados, descartados, arrojados, descompuestos; pueden volverse a unir, a desarmarse. Existe un recorrido para cada lector que a su vez cambia con cada lectura. Cada nodo aspira a estimular un intercambio dinámico y fecundo entre arte, ciencia, literatura y humanidades en un flujo recíproco que potencie el conocimiento e impulse un crecimiento humano e intelectual.

Gustavo Ariel Schwartz | Víctor E. Bermúdez
San Sebastián, junio de 2017

Agradecimientos

#Nodos ha sido escrito en el marco del Programa Mestizajes, un espacio alternativo para el encuentro entre artistas, escritores y científicos destinado a propiciar nuevas interacciones entre ciencia, literatura y humanidades. Este libro es el resultado de una colaboración entre un científico y un humanista, pero es, sobre todo, una obra colectiva y global con una clara vocación transdisciplinar y un espíritu de integración más allá de las fronteras geográficas o disciplinares. Este libro no habría sido posible sin la generosa y desinteresada colaboración de todas las personas que han contribuido a él no solo aportando sus textos sino también proporcionando una mirada propia a cada uno de los temas propuestos. La singularidad y el valor de este libro es resultado de la heterogeneidad y la excelencia de sus colaboradores.

Agradecemos a todas las personas e instituciones que han hecho posible este proyecto: al Donostia International Physics Center por el soporte económico e institucional. A Ricardo Díez Muiño y Pedro Miguel Echenique por el apoyo permanente e incondicional al Programa Mestizajes. Al Centro de Física de Materiales de San Sebastián y al Consejo Superior de Investigaciones Científicas. A José Manuel Sánchez Ron por prologar generosamente este libro. Y a tantos otros que de una u otra forma han colaborado con *#Nodos*. A todos, muchísimas gracias.



Índice

Prólogo	19	Necesidad de la metáfora	69
		<i>Amelia Gamoneda</i>	
<hr/> <hr/>			
#Redes complejas		Atravesar la merma: condición de red-emergente de la metáfora	73
		<i>Iván Méndez González</i>	
Enredando ciencias y humanidades	25	Metáfora y neuroimagen: cómo arte y neurociencia se nutren mutuamente	78
		<i>Clara Martín</i>	
La sublime sencillez de las redes complejas		Realismo complejo (o la línea Año Cero de las cosas)	82
<i>Gustavo Ariel Schwartz</i>	27	<i>Agustín Fernández Mallo</i>	
Tejiendo mundos		Una aproximación a la metáfora desde la teoría de conjuntos	86
<i>Josep Perelló</i>	32	<i>Javier Moreno</i>	
Palabras como sistemas dinámicos		Peligros y riquezas de la metáfora científica en literatura	91
<i>Marta Macho Stadler</i>	35	<i>Vicente Luis Mora</i>	
Redes complejas: una oportunidad para reflexionar sobre los misterios del lenguaje		Las curiosas metáforas científicas	95
<i>Bernat Corominas-Murtra</i>	38	<i>Dudley Herschbach</i>	
Evolución, redes complejas y detectores de belleza		Otros tipos de conocimiento	100
<i>Albert Flexas Oliver</i>	42	<i>Melissa Pierce Murray</i>	
Cultura y complejidad		Colofón	106
<i>Juan Luis Suárez</i>	46	Referencias	107
Mapeo de redes: ciencia y altruismo			
<i>Kevin W. Boyack y Richard Klavans</i>	51		
Macroscopios para explorar y navegar entre la ciencia y la tecnología			
<i>Lisel Record y Katy Börner</i>	56		
Colofón	61		
Referencias	62		
<hr/> <hr/>			
#Metáfora		#Cosmos	
		De las partículas elementales a la inmensidad cósmica	113
El nodo es la guarida de lo insólito	67	Magia en cada rincón	115
		<i>Alberto Güijosa</i>	
		Niveles de realidad y vacío cuántico	119
		<i>Basarab Nicolescu</i>	

Noches estrelladas
Juan José Gómez Cadenas 124

Ondas, partículas y todo lo contrario
Jaume Navarro 128

Sincretismo en el Cántico cósmico de Ernesto Cardenal
Catalina García García-Herreros 131

Corona del sol
Jairo Rojas Rojas 135

Más allá de cierta densidad
Gilles Cyr 141

Jugando con ecuaciones
Luca Pozzi 145

Re(con)figurando el CERN
Ariane Koek 149

La investigación de satélites perdidos: narrativas de la «cultura oscura»
Poe Johnson y Roger F. Malina 154

Colofón 159

Referencias 160

#Caos y complejidad

Cuando lo excepcional deviene en norma 165

Simplemente caos y complejidad
Diego A. Wisniacki 167

¿Existe una teoría de la complejidad?
Jorge Wagensberg 171

Narrar el tiempo
Bruno Arpaia 175

Narrativas de la complejidad
Luis Felipe G. Lomelí 178

Apropiación literaria de la teoría del caos
Belén Gache 183

Complejidad y creatividad en la narrativa de Marcelo Cohen
Joanna Page 188

De Boreales: firmas del tiempo
Amy Catanzano 192

Expresionismo fractal
Gustavo Ariel Schwartz 197

Colofón 201

Referencias 202

#Emergencia

De las moléculas a la creatividad 207

Emergencia
Markus I. Eronen 209

Entre las moléculas y la vida: dos metáforas para indagar sobre la emergencia de la organización biológica
Kepa Ruiz-Mirazo 213

Proteínas, priones y recuerdos
Silvina Cervený 219

El altruismo: ¿epifenómeno o propiedad emergente?
Juan Ignacio Pérez Iglesias 223

Lo adyacente posible: restringir para posibilitar
Stuart Kauffman 227

Sobre la creatividad lingüística
Jordi Fortuny Andreu 232

Emergencia temática. Para una microteoría del relato hiperbreve
Luisa Etxenike 236

Una exploración del bioarte y la biología sintética
Anna Dumitriu 239

Crear las condiciones. El potencial artístico de un organismo unicelular
Heather Barnett 242

Albert vs. Máquina
Albert Barqué-Duran 248

El mejor ejemplo de una transdisciplinariedad práctica: la Cortona Week
Pier Luigi Luisi 254

Colofón 259

Referencias 260

#Percepción

La indisciplina de la percepción 265

Literatura y ciencia del percepto
Víctor E. Bermúdez 267

De los fotones a la cognición: percepción, memoria y arte en el cerebro
Alejandro Galvez-Pol 272

Imágenes de interioridad: luz y poesía
Débora Ochoa 277

La belleza de lo inesperado: ¿por qué nuestras predicciones modelan nuestra percepción?
Nicola Molinaro 281

La percepción del lenguaje y la eficiencia computacional
Itziar Laka 285

Y recuerdo una sensación de tirantez en la piel
James Wilkes 289

Neuroestética
Anjan Chatterjee 292

Cinco poemas
Rafael-José Díaz 295

Colofón 301

Referencias 302

#Memoria

(Astuta) historia de las ideas de la memoria 307

La disciplina del olvido: ligero tránsito por la ciencia de la memoria literaria
Víctor E. Bermúdez 309

Adamantino
Roald Hoffmann 315

Viaje mental en el tiempo
Helena Matute 317

Recordaré esta mano
Siri Hustvedt 320

Hueco que deja tu mano en la piel
Iván Méndez González 324

El señor Funes
Eduardo Berti 329

Funes vs. Aniston: neurociencia y literatura
Rodrigo Quián Quiroga 331

Memoria asociativa, arte figurativo y conceptos abstractos <i>Eiling Yee y Gerry T. M. Altmann</i>	334	Emoción/emocionalismo desde la semiótica y las ciencias sociales <i>Manuel González de Ávila</i>	385
De la huella a la imagen residual: explorando el tema de la memoria en la instalación escultórica <i>Ewa Wesolowska</i>	340	Colofón	389
Colofón	344	Referencias	390
Referencias	345		
<hr/> <hr/>		<hr/> <hr/>	
#Emoción		#Conciencia	
Los trucos del espasmo	349	Yo, myself and I	395
Trans-disciplinas de la emoción literaria <i>Víctor E. Bermúdez</i>	351	(Auto)conciencias paralelas <i>Miguel Amores Fúster</i>	397
Repetir el litoral <i>Hugo Milhanas Machado</i>	356	Autoconciencia y evolución <i>Xurxo Mariño</i>	403
El sentimiento de escribir (perspectiva biocultural) <i>Jean-Simon DesRochers</i>	358	Lo que el ojo de la rana le dice al cerebro del filósofo <i>Germán Sierra</i>	407
La educación sentimental (del lector) <i>Jose Valenzuela</i>	361	El cuerpo ilusorio: ficciones a tiempo real <i>Carlos López de Silanes de Miguel</i>	412
Vértigo caliente, vértigo frío <i>Menchu Gutiérrez</i>	366	Las dimensiones metafóricas de la conciencia <i>Marc-Williams Debono</i>	416
Reparar el aún, verbalizar el sentir <i>Candela Salgado Ivanich</i>	370	Experiencia estética/estados de conciencia psicodélicos <i>Pierre-Louis Patoine</i>	420
El misterioso soporte de las impresiones <i>Chantal Maillard</i>	375	El estudio cognitivo de la literatura y sus aportaciones al estudio de la conciencia <i>Isabel Jaén Portillo</i>	423
Alumbramiento <i>María Sánchez</i>	382	El cerebro de mi padre <i>Jorge Volpi</i>	427
		That's the question: la conciencia según Erwin Schrödinger <i>Clara Janés</i>	431

**Breves apuntes sobre la relación
entre la consciencia del objeto creado
y la de su creador**
Joséagustín Hayadelatorre 436

**Salvando las distancias
entre el arte y la ciencia**
Julia Buntaine 440

Colofón 444

Referencias 445

#Big data

Más es diferente 449

**El saber frente al diluvio: investigación
basada en ciencia de datos y discurso
académico en el siglo XXI**
Mark Daley 451

Los estudios literarios a lo grande
Mario Aquilina 456

**Complementariedad de los *big data*
y los estudios literarios**
Borja Navarro Colorado 460

#Espacios de indeterminación
Kristin Veel 465

Los *big data* y lo incognoscible
Javier Argüello 469

**Ciencia de datos
en el Instituto Alan Turing**
Andrew Blake 472

Los datos como material artístico
Julie Freeman 475

Arte y *big data*
Juan Luis Suárez 480

Colofón 485

Referencias 486

Autores 487

Prólogo

Hubo un tiempo, ya lejano, en el que se pensaba que la ciencia podía explicar la naturaleza, el universo, tanto en su grandiosa inmensidad como en sus más minúsculos recovecos, mediante leyes en cierto sentido sencillas —no importaba que encontrarlas y desarrollar todas sus potencialidades fuese difícil, muy difícil a veces; recordemos, sin ir más lejos, los problemas a los que se enfrentaban los físicos matemáticos que pugnaban por construir una mecánica celeste satisfactoria—. El sueño de «una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos» que Pierre-Simon Laplace plasmó en su inolvidable *Essai philosophique sur les probabilités* (1814), resultó ser eso, un sueño, esplendoroso pero fugaz. La ciencia newtoniana, al igual que la maxwelliana —lineales ambas en un sentido matemático—, los pilares sobre los que se asentó hasta no hace mucho nuestra visión científica del mundo, no fueron suficientes para sostener el sueño laplaciano. La no linealidad, plasmada en dominios como el caos —que atisbó el gran Poincaré, pero que no supo sistematizar—, la, en definitiva, *complejidad* se ha adueñado del sempiterno proyecto de comprender el mundo, a la manera —la única posible de verdad— de la ciencia. Solo sistemas no lineales son capaces de explicar la aparición de nuevas propiedades; esto es, las emergencias que vemos constantemente alrededor nuestro, y en nosotros mismos —somos seres no lineales-complejos—. Y la complejidad nos ha llevado, casi de la mano, haciéndonos ver que no existía otra forma de que la empresa científica avanzase, al mundo del que se ocupa este extraordinario —por su ambición, originalidad y ubicuidad— libro, un mundo de redes complejas. Como se señala en las primeras páginas del mismo: «En las últimas décadas el mundo se ha enredado».

La cuestión es: ¿Es esto sorprendente? Dar respuestas a preguntas que ya han sido contestadas no tiene, evidentemente, ningún mérito. Y en este sentido, ahora que vemos cuán interconectado está todo, los fenómenos naturales entre sí, y nosotros, los humanos y las sociedades que hemos construido, con la naturaleza, es no fácil sino obligado hacer filosofía de la complejidad del mundo. Pero, en realidad, lo que habría sido sorprendente es que bastase con las divisiones —ciencias— que habíamos establecido, y que, justo es reconocerlo, tan buen resultado dieron; que fuera suficiente con mantenerse en el esquema de «esto lo explica eso que llamamos física, aquello la química, lo otro la biología, etcétera», y que una cosa son las ciencias sociales, o las humanidades, o el arte —pintura, música—, y otra las ciencias de la naturaleza. La naturaleza, con nosotros y la vida que ha surgido en este planeta, es una, no conoce de divisiones, solo de relaciones entre sí, de puntos de encuentro, de nodos, los *nodos*, las redes complejas de las que se ocupa este libro.

No sé qué admirar más de las páginas que siguen. Ya solo los apartados en los que está dividido el libro —«Redes complejas», «Metáfora», «Cosmos», «Caos y complejidad», «Emergencia», «Percepción», «Memoria», «Emoción», «Conciencia» y «*Big data*»— constituyen algo así como el árbol genealógico de lo que podría ser una Visión del Mundo —con mayúsculas—. Una obra en la que la temática científica y la originalidad de sus planteamientos se hermanan con la buena literatura, esa que te captura por su estilo y te sorprende por sus contenidos.

José Manuel Sánchez Ron
Madrid, 10 de julio de 2017

REDES
COMI

PLEJA^s

#Redes complejas

Enredando ciencias y humanidades	25
La sublime sencillez de las redes complejas , <i>Gustavo Ariel Schwartz</i>	27
Tejiendo mundos , <i>Josep Perelló</i>	32
Palabras como sistemas dinámicos , <i>Marta Macho Stadler</i>	35
Redes complejas: una oportunidad para reflexionar sobre los misterios del lenguaje , <i>Bernat Corominas-Murtra</i>	38
Evolución, redes complejas y detectores de belleza , <i>Albert Flexas Oliver</i>	42
Cultura y complejidad , <i>Juan Luis Suárez</i>	46
Mapeo de redes: ciencia y altruismo , <i>Kevin W. Boyack y Richard Klavans</i>	51
Macroscopios para explorar y navegar entre la ciencia y la tecnología , <i>Lisel Record y Katy Börner</i>	56
Colofón	61
Referencias	62

Enredando ciencias y humanidades

El estudio de las redes no es algo nuevo. Existe un extenso recorrido que va desde la sociología hasta las redes complejas y cuyos orígenes se remontan hasta principios del siglo XVIII, cuando Leonhard Euler funda la teoría de grafos al resolver de manera formal el llamado «problema de los siete puentes de Königsberg». Euler inaugura así una nueva rama de las matemáticas que se convertiría en la base formal del estudio de redes. Casi dos siglos después, el psicólogo austriaco Jacob Levy Moreno desarrolla los sociogramas para representar gráficamente las relaciones entre individuos en un grupo social dado (Moreno, 1934). Desde principios del siglo XX, algunos sociólogos han utilizado el término «redes sociales» y han insistido en la importancia de estudiar la estructura y los patrones de las redes de relaciones entre personas. En la década de 1970 el sociólogo Wayne Zachary analizó durante tres años los vínculos de amistad de 34 miembros de un club de kárate representando la información en un diagrama de red que le permitió predecir el comportamiento del grupo (Zachary, 1977).

¿Por qué entonces el estudio de las redes complejas cobra tanta relevancia recién a principios del siglo XXI? ¿Por qué la ciencia de redes no surgió con fuerza a partir de los trabajos de Euler? Existen dos razones fundamentales que han demorado el surgimiento del análisis de las redes complejas: por un lado, la dificultad para acceder a los datos —o la incapacidad para recolectarlos y compartirlos— y, por otro, la ausencia de herramientas matemáticas e informáticas avanzadas que permitan visualizar y analizar redes suficientemente grandes y/o complejas (Newman, 2015). El desarrollo de Internet ha logrado, de manera directa o indirecta, resolver ambos problemas; pero más importante aún es el hecho de que la familiaridad con la que nos movemos en Internet ha permitido que el concepto de red se incorpore de manera natural en nuestro imaginario. Desde entonces hemos comenzado a mirar el mundo como un conjunto de redes: sociales, comerciales, de transporte, profesionales, financieras, etc. Esta nueva «conectividad global» ha sacado a la luz

problemas que no podríamos habernos planteado hace dos, cinco o quince siglos simplemente porque no formaban parte del imaginario.

El uso de las redes complejas para abordar determinados problemas no representa solo una mejora cuantitativa de nuestros métodos de análisis, sino fundamentalmente un salto cualitativo en la manera de pensar el mundo. La realidad es algo mucho más imbricado de lo que podríamos habernos imaginado. Descubrimos vínculos sutiles entre ideas, conceptos o eventos que no creíamos relacionados; ya no existen hechos o acontecimientos aislados. Pero quizás el aspecto más importante del análisis de redes sea el hecho de que más allá de las diferencias evidentes entre distintos sistemas —propagación de epidemias, Internet o una red de obras literarias—, las redes poseen propiedades universales que dependen solo de la manera en la que están estructuradas. El comportamiento complejo de las redes está más relacionado con la naturaleza de las interacciones entre los elementos que con la naturaleza de los elementos en sí (Solé, 2010). De modo que las redes complejas permiten abordar una gran variedad de fenómenos que van desde las humanidades hasta las ciencias naturales pasando por el arte y la literatura. Surge de este modo una herramienta matemática transversal que ofrece un lenguaje común a través del cual puede establecerse un diálogo fluido entre diferentes disciplinas.

Las redes complejas ofrecen un aporte doble a la convergencia de las ciencias y las humanidades. Por un lado, proporcionan una herramienta matemática con la que abordar determinados problemas en otras disciplinas —interdisciplinariedad—. Por ejemplo, el estudio del lenguaje, la cultura o la belleza mediante el análisis de redes complejas. Por otro lado, las redes complejas aportan un marco mucho más amplio y transdisciplinar que permite revelar las sutiles relaciones entre los diferentes ámbitos del conocimiento mostrando espacios de convergencia.

Por primera vez podemos integrar en un marco teórico común fenómenos de las ciencias, las artes, la literatura y las humanidades. Mediante el análisis de redes complejas es posible cuantificar problemas que hasta hace poco tiempo eran inabordables desde el punto de vista científico. Sin embargo, no debemos perder de vista el hecho de que las redes complejas, como cualquier otra modelización, solamente captan una parte de la realidad. Y la realidad no debería reducirse a lo que solo puede expresarse de manera matemática. Las redes complejas constituyen por lo tanto una herramienta útil para estudiar tan solo algunos aspectos de la realidad. El objetivo no consiste en matematizar los problemas de las humanidades, sino en aportar herramientas que permitan detectar conexiones y propiedades que no necesariamente van a ser explicadas desde la matemática o la física. En definitiva, el propósito último es poner de manifiesto en diversos ámbitos del conocimiento fenómenos que hasta ahora no eran evidentes; parafraseando a Paul Klee, «las redes complejas no reproducen lo visible; vuelven visible». ○

La sublime sencillez de las redes complejas

Gustavo Ariel Schwartz

En las últimas décadas el mundo se ha enredado. Vemos redes por todas partes: desde redes sociales a redes terroristas, desde redes de telefonía móvil a redes neuronales; redes de transporte, redes que regulan el metabolismo, redes de colaboraciones científicas, de escritores, de obras artísticas, de palabras. El estudio de las redes complejas permea los más diversos ámbitos de las ciencias y de las humanidades y permite abordar de manera cuantitativa el estudio de fenómenos hasta hace poco tiempo impensables. Muchos sistemas, tanto artificiales —Internet, la red eléctrica, el tráfico aéreo— como naturales —complejos de proteínas, ecosistemas, sociedades—, tienen en común el hecho de que pueden ser pensados en términos de redes: es decir como un conjunto de *nodos* —puntos, objetos, conceptos— unidos entre sí por *enlaces* —líneas, relaciones, vínculos—. La manera en que los diversos nodos se relacionan entre sí determina la estructura de la red y esta estructura afecta tanto a la dinámica como a las propiedades generales del sistema.

Las redes complejas se caracterizan, entre otras cosas, porque la distancia topológica —medida en términos de enlaces— entre dos nodos cualesquiera de la red es relativamente pequeña. Esta propiedad se conoce popularmente con el nombre de «mundos pequeños» (*small worlds*). En los años sesenta del siglo pasado, el psicólogo Stanley Milgram (1967), de la Universidad de Harvard, llevó a cabo un experimento en el que mostraba que dos personas cualesquiera de Estados Unidos estaban conectadas entre sí a través de tan solo otras cinco personas —en promedio—. Es lo que se conoce como el fenómeno de los «seis grados de separación» en redes sociales. A finales de los años noventa, los investigadores Duncan Watts y Steven Strogatz (1998) formalizaron el problema y desarrollaron una serie de modelos y herramientas matemáticas para abordar el estudio cuantitativo de las redes complejas. Al año siguiente, los físicos László Barabási y Réka Albert (1999) introducen el concepto de redes «libre de escala» en el que sería luego uno de los artículos seminales en el estudio de las redes complejas. Curiosamente, el expe-

rimento propuesto por Milgram había sido planteado treinta años antes por el escritor húngaro Frigyes Karinthy, en un cuento titulado *Chains*. Así, la teoría de redes complejas se ha nutrido en sus orígenes de ideas literarias y de terminología y herramientas matemáticas y estadísticas provenientes de los ámbitos de la psicología y la sociología.

Las redes complejas pueden ser físicas o virtuales, y ambos tipos se pueden representar de manera abstracta mediante grafos. En el primer caso nos referimos, por ejemplo, a la red de conexiones entre neuronas en el cerebro; mientras que un tipo de red virtual podría ser un ecosistema en el que los nodos representan las diferentes especies y los vínculos las relaciones presa-depredador entre ellas. El valor del análisis de redes complejas radica en que las propiedades del sistema y las herramientas matemáticas que permiten determinar los diferentes parámetros no dependen de que la red sea física o virtual, sino solo de su estructura. Además, para un mismo sistema se puede dar el caso de que los nodos o los enlaces representen elementos diferentes. Si queremos analizar el sistema de publicaciones científicas, los nodos podrían ser tanto los temas de investigación como las revistas o los artículos. En este último caso, la relación entre artículos científicos puede venir dada por las citas, los autores o las palabras clave. La elección de los elementos para los nodos y del tipo de relación entre estos depende del tipo de pregunta que busquemos responder.

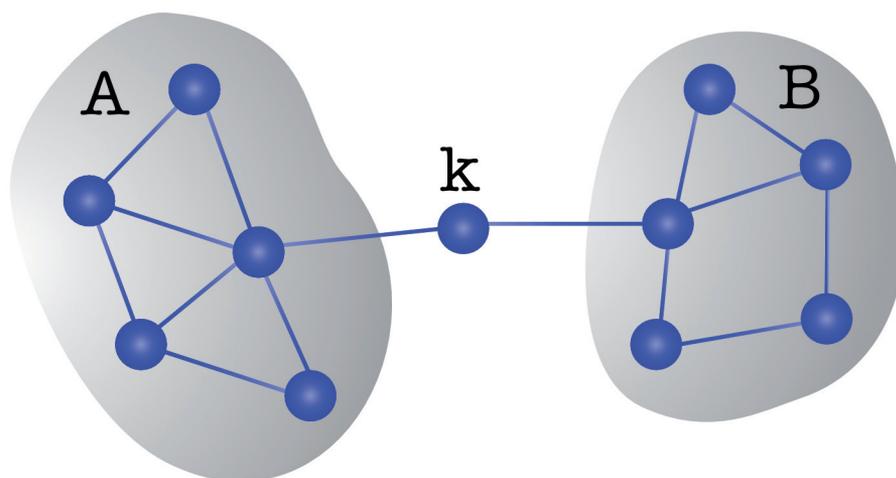


Figura 1. Pequeña red compuesta por once nodos conectados entre sí. Se aprecian claramente dos clústeres (A y B) y un nodo que los interconecta (k).

Independientemente de que estemos trabajando con una red física o virtual, y de qué elementos representen los nodos y sus vínculos, existe una serie de parámetros y propiedades «universales» que son comunes a todas las redes y que dependen no tanto de los nodos sino de cómo se hallan interconectados. Tras definir los nodos y sus relaciones, el siguiente paso para analizar la estructura de una red consiste en representarla gráficamente. Si la red es pequeña, es posible hacerlo manualmente tal como muestra la [figura 1](#). Si la red es demasiado extensa y contiene miles o millones de nodos interconectados, entonces serán necesarios programas de visualización de datos para poder representarla. En el primer caso es relativamente sencillo analizar la red y el cerebro humano es muy hábil para encontrar patrones en este tipo de esquemas. Sin embargo, esto es imposible para redes demasiado grandes y/o complejas. Necesitamos en este caso la ayuda de herramientas matemáticas e informáticas que nos permitan determinar ciertas características estructurales de la red.

Una inspección rápida de la [figura 1](#) permite identificar algunas características elementales de las redes: la cantidad de conexiones de cada nodo, su «centralidad», la cantidad de «pasos» que separan dos nodos, etc. Si llamamos N al número de nodos y E al número de enlaces totales de la red, entonces las redes complejas se diferencian de las «simples» por presentar generalmente grandes valores de N y valores pequeños de E/N . Uno de los conceptos elementales de una red es el de «centralidad». Esto significa determinar cuáles son los nodos centrales o más importantes de la red. Si bien existen diferentes formas de medir la centralidad de un nodo, quizás la más simple consiste en determinar el número de enlaces que posee. En la jerga técnica este parámetro se denomina «grado de centralidad» (*degree centrality*). En una red social, los individuos con altos valores de grado de centralidad se pueden considerar como los más influyentes.

Muchas redes se dividen naturalmente en subgrupos o agregados denominados clústeres (*clusters*). En algunos casos, la identificación de clústeres puede proporcionar información muy valiosa acerca de cómo se estructura el sistema; algo que sería muy difícil de obtener de otra manera. Por ejemplo, las redes sociales se agregan de manera natural según ciertos factores como el idioma, la edad o la región geográfica; sin embargo, mediante análisis de redes es posible detectar clústeres más sutiles relacionados con los intereses de las personas, los sitios web que visitan o las ideas políticas. En el caso de redes pequeñas —como la de la [figura 1](#)— la identificación de los clústeres es trivial. No obstante, cuando las redes poseen miles o millones de nodos es necesario recurrir a herramientas matemáticas avanzadas para calcular lo que se denomina «coeficiente de agregación» (*clustering coefficient*); es decir, en qué medida los nodos tienden a formar clústeres. Otro parámetro esencial de las redes es la «centralidad intermedia» (*betweenness centrality*), que mide la fracción de caminos entre los otros nodos de la red que pasan a través de un cierto nodo. En la [figura 1](#) vemos que si bien el nodo **k** presenta un grado de centralidad bajo (2), la centralidad intermedia es relativamente alta

ya que todos los caminos que unen nodos del clúster **A** con otros del clúster **B** pasan a través del nodo **k**.

El estudio de las redes revela que en un sistema complejo es mucho más importante la manera en que los elementos están relacionados e interactúan que los elementos en sí. La conectividad de la red define en gran medida el grado de complejidad que puede alcanzar el sistema. Las redes complejas, lejos de ser un pasatiempo matemático o una herramienta solo aplicable a unos pocos problemas científicos o académicos, han producido una revolución en la manera de abordar el estudio de los sistemas complejos. La posibilidad de aplicar el formalismo de las redes complejas a problemas tan variados como Internet, el tráfico aéreo, la propagación de enfermedades o rumores, el estudio del lenguaje o los movimientos migratorios, entre muchos otros, supone un cambio de paradigma en la manera en que organizamos la realidad. Se abandona el pensamiento lineal en favor de una racionalidad compleja, no lineal y descentralizada. Las redes complejas constituyen un sustrato matemático común para muchos problemas de las ciencias y de las humanidades y un punto de encuentro fértil para abordar problemáticas transdisciplinarias. ■

#referencias

- Barabási, Albert-László & Albert, Réka. «Emergence of scaling in random networks». *Science*. Vol. 286. 1999: 509-512.
- Milgram, Stanley. «The Small World Problem». *Psychology Today*. Vol. 1. 1967: 61-67.
- Newman, Mark E. J. *Networks. An Introduction*. Oxford University Press. 2015.
- Strogatz, Steven H. «Exploring complex networks». *Nature*. Vol. 410. 2001: 268-276.
- Watts, Duncan J. & Strogatz, Steven H. «Collective dynamics of “small-world” networks». *Nature*. Vol. 393. 1998: 440-442.

#glosa

Pensar ciertos problemas en términos de redes, de entidades interconectadas, de relaciones no lineales, supone un cambio drástico para la cultura occidental. Renunciar a más de veinte siglos de pensamiento lineal, de causalidades bien establecidas o de determinismo puro y duro no es sencillo. De hecho, muchas de las propiedades de las redes complejas nos sorprenden precisamente porque rompen con esa lógica lineal.

Las redes complejas proporcionan a las humanidades una manera radicalmente nueva y provechosa de abordar determinados problemas. Así, por ejemplo, The CulturePlex Lab de la Western University, en Canadá, es un grupo de investigación en humanidades digitales que reúne a humanistas, científicos computacionales, matemáticos, ingenieros y diseñadores para modelar problemas tradicionales de humanidades a partir del uso de *big data* y redes complejas. Entre otros trabajos, estos investigadores analizan el comportamiento humano mediante «analítica cultural» (*cultural analytics*). Combinando técnicas de análisis de *big data* y redes sociales han sido capaces de modelar el comportamiento de individuos o poblaciones en determinados contextos. Estas nuevas técnicas abren un sinfín de posibilidades tanto en ciencias sociales como en humanidades y permiten no solo comprender nuevos fenómenos sino también simular ciertas situaciones variando tanto las propiedades del contexto como las de los agentes involucrados.

En el ámbito científico, uno de los proyectos más ambiciosos relacionados con las redes complejas pretende obtener un mapa completo de las conexiones del cerebro humano. De hecho, existen actualmente varias iniciativas tales como el Human Connectome Project, en Estados Unidos, y su contraparte europea, el Human Brain Project, cuyos objetivos consisten en desarrollar los métodos y las tecnologías que permitan proporcionar un mapa preciso y completo, a nivel neuronal, del cerebro de mamíferos. Hasta ahora, el único mapa completo de conexiones entre neuronas del que disponemos es el del gusano *C. elegans*, que tiene tan solo 300 neuronas —en comparación con los 85.000 millones que tiene el cerebro humano—. Se espera que a partir del mapeo del cerebro humano podamos comprender mejor muchos aspectos de su funcionamiento. Sin embargo, como ya ha ocurrido con el proyecto del genoma humano, es muy probable que el mapeo de nuestro cerebro traiga consigo más preguntas que respuestas. Nos daremos cuenta entonces de todo aquello cuyo desconocimiento ignorábamos.

Las redes complejas permiten pensar la realidad de otra manera; permiten abrir el juego e incorporar en el estudio de diversos fenómenos ciertos elementos que tradicionalmente no pertenecían al ámbito científico. El azar y la complejidad entran por fin —de manera «oficial»— en el mundo de las «ciencias duras» permitiendo un diálogo hasta entonces casi inexistente con los ámbitos de las artes, la literatura y las humanidades. ○

Tejiendo mundos

Josep Perelló

La física de los inicios del siglo pasado descubre el caos en los sistemas planetarios de la mano de Jules Henri Poincaré. El caos admite la imposibilidad del determinismo a ultranza en sistemas con tan solo tres elementos en interacción. Añadir más elementos a un sistema imposibilita predecir perfectamente su futuro, ya sean planetas, péndulos o muelles. Este fue un gran dolor de cabeza para los científicos más reflexivos como el propio Poincaré. El mecanicismo para entender el mundo, patas arriba. El físico y matemático francés también reflexionó durante las primeras décadas del siglo XX acerca de la creatividad: un fenómeno que atañe a una configuración inestable de diversos elementos que encajan de forma emergente, sin prefiguración consciente alguna. Según Poincaré, la novedad irrumpe a partir del caos, con múltiples elementos en interacción que cristalizan al menos provisionalmente en estructuras discursivas que denominó *toutes-faites*, y Poincaré escoge como metáfora la meteorología para contarlos. Marcel Duchamp, de hecho, representa una nube en la parte superior de su obra *El gran vidrio*. La pieza, azarosamente agrietada y con un engranaje para moler semillas de cacao en su parte inferior a modo de parodia mecanicista es crucial en la trayectoria de un artista que también exploró los *ready-made* (o *toutes-faites*) como condensaciones de materia que engendran ideas y ocurrencias pendientes de cierta interpretación por parte del espectador. Duchamp leía ciencia variada y tampoco debía ser casualidad que dejase pasar sus ojos por libros sobre geometría no euclidiana que demuestran que la distancia más corta entre dos puntos del espacio no es necesariamente la línea recta. A partir del siglo XIX, tanto las formas curvilíneas como el incremento de dimensiones del espacio dieron con nuevas herramientas matemáticas donde, entre otros casos, la temprana especulación de la teoría de grafos lleva a la física a plantear las interacciones entre elementos concretos de forma geométrica. El juego recuerda las cisuras curvilíneas de Gordon Matta-Clark en edificios abriendo vacíos y forzando nuevas perspectivas. La mutación de la teoría de grafos en las

llamadas redes complejas considera que una mayor proximidad puede ser sinónimo de una más fuerte correlación, pudiéndose hablar de intensidad gravitatoria entre objetos galácticos, pero también del flujo de llamadas telefónicas entre dos ciudades distintas. Los artefactos matemáticos y la correspondiente algoritmia es la misma a pesar de que la interacción y los elementos puedan ser de naturaleza muy distinta. Las redes complejas negocian la intensidad en la interrelación de distintos elementos y proponen mapas para orientarse en el mundo de otro modo. Los *big data* y la agregación de centenares, millares o millones de elementos en interacción es sin duda el mejor aliado de las redes complejas. Las redes complejas recogen una riqueza invisible y detectan clústeres de lugares que no necesariamente son los más próximos en distancias medidas en kilómetros. Dentro de las llamadas humanidades digitales, por ejemplo, también hay quien recogiendo los lugares de nacimiento y de defunción de creadores lee los movimientos migratorios del viejo al nuevo mundo (Schich *et al.*, 2014). Los caminos de ciudadanos cruzados con trazas semánticas de posts geolocalizados en redes sociales (Quercia *et al.*, 2014) hacen realidad la psicogeografía masiva que propusieron los situacionistas décadas atrás. Los caminos más rápidos en tiempo no son necesariamente los más frecuentados y las redes complejas permiten retener otras dimensiones relacionadas con la movilidad humana. Las redes complejas y sus algoritmos incluso detectan comunidades (Poncela-Casasnovas *et al.*, 2016) en un bosque de datos donde es difícil encontrar patrones, especies o similitudes entre individuos. Aparece una estructura, un orden espontáneo que aspira a comprender el caos de hace un siglo. Se desea encontrar nuevas lecturas, aunque solamente tengan valor estadístico y sin afirmaciones contundentes. Un mundo más blando y dócil surge. Un arte como el de Antoni Abad con invidentes, prostitutas o taxistas se encarga de tejer relaciones (Parés *et al.*, 2014). Refuerza comunidades para hacerlas visibles, para cambiar el mundo a través de la complejidad y sus redes. ■

#referencias

- Parés, Roc *et al.* *Antoni Abad. megafone.net/2004-2014*. Editorial MACBA / Museu d'Art Contemporani de Barcelona, Turner y AC/E. 2014.
- Poncela-Casasnovas, Julia *et al.* «Humans display a reduced set of consistent behavioral phenotypes in dyadic games». *Science Advances*. Vol. 2(8). e1600451. 2016.
- Quercia, Daniele; Schifanella, R.; Aiello, L. M. «The shortest path to happiness: Recommending beautiful, quiet, and happy routes in the city». *Proceedings of the 25th ACM conference on Hypertext and social media*. ACM. 2014: 116-125.
- Schich, Maximilian *et al.* «A network framework of cultural history». *Science*. Vol. 345(6196). 2014: 558-562. También vídeo: Nature Video. «Charting Culture».

#glosa

La idea del caos como generador de orden, de novedad o incluso de creatividad es algo que sin duda no estaba presente en la agenda de los grandes pensadores de la Ilustración. La obsesión occidental por el orden y el control excluía sin miramientos al caos de cualquier intento de comprender la realidad. Por otra parte, la interacción entre múltiples elementos de un sistema era algo que no podía plantearse fácilmente desde la ciencia hasta hace tan solo unas décadas. El estudio de las redes se limitaba entonces a dos casos extremos: por un lado, los arreglamientos regulares —de átomos en un cristal o de ubicaciones en un mapa— y por otro las redes aleatorias —principalmente los trabajos de Erdős y Rényi (1959, 1961)—. Sin embargo, estos dos casos presentan características topológicas triviales sin mayor interés, mientras que las redes complejas, a mitad de camino entre las regulares y las aleatorias, presentan propiedades singulares que las hacen particularmente apropiadas para abordar diversos tipos de problemas del mundo real en ámbitos extremadamente diversos.

Recientemente se ha aplicado el formalismo de las redes complejas para estudiar con cierto éxito en literatura problemas que van desde la identificación de movimientos literarios (Amancio *et al.*, 2012) hasta la «red social» de los personajes de *Alicia en el País de las Maravillas* (Awargal *et al.*, 2012). La digitalización de una parte importante del corpus literario universal y la proliferación de diversos algoritmos para el tratamiento de datos han generado en los últimos años un volumen muy significativo de trabajos de investigación que forman parte de lo que se denominan las «humanidades digitales», es decir, el estudio de problemas del ámbito de las humanidades utilizando, entre otras, herramientas como los *big data* o las redes complejas.

Uno de los aspectos más interesantes del uso de las redes complejas en humanidades digitales no es tanto la posibilidad de responder a viejas cuestiones como su capacidad para formular nuevas preguntas. ¿Qué estructuras de redes sociales encontramos en la ficción? ¿Cómo han evolucionado estas estructuras con el tiempo? ¿Cuáles son los vínculos estilísticos, estructurales y formales entre el canon y el corpus de una determinada época y cultura? ¿Qué podemos aprender acerca de las estructuras narrativas si las pensamos en términos de redes complejas? ○

Palabras como sistemas dinámicos

Marta Macho Stadler

Gozzi —dijo Goethe— afirmaba que solo existen treinta y seis situaciones trágicas. Schiller se esforzó mucho por encontrar más, pero no llegó a descubrir tantas como Gozzi.

Johann Peter Eckermann

Las redes complejas acompañan —¿gobiernan?— nuestra vida: desde las redes sociales a las redes de conexión de nuestro cerebro, la materia que nos rodea interactúa y se organiza. Estas redes son, de hecho, sistemas dinámicos —sistemas matemáticos, físicos, biológicos, económicos, etc., que evolucionan con el tiempo— cuyo estudio teórico es un campo multidisciplinar que precisa de la aplicación de complejas y diversas técnicas geométricas, topológicas, analíticas y probabilísticas. En el estudio cualitativo de un sistema dinámico no se persigue medir, sino comprender si en algún momento el sistema llegará a un estado de equilibrio. En algunos sistemas dinámicos existen puntos fijos que no evolucionan con el tiempo. Estos elementos pueden incluso ser atractores, es decir, los puntos cercanos convergirán hacia ellos. Sucede lo mismo en las redes complejas, que poseen en muchas ocasiones nodos «atractores», a los que se llega de forma inevitable, siempre que se esté conectado y suficientemente cerca.

El cuentacuentos Héctor Urién defiende que los relatos cambian al ser narrados, pero que siempre existen ciertos atractores que hacen reconocibles las historias, a pesar de ser moldeadas y transformadas por el narrador. Urién se refiere a la narración oral, que se diferencia de la escrita precisamente por su carácter dinámico. Defiende que los relatos orales están en continuo cambio, se transforman cada vez que varían el cuentista, el público o el entorno. Entiendo que Urién los presiente como una red compleja, en la que la estructura del relato muta, se mueve, evoluciona, se recombina, se reinventa. ¿Y cómo es posible que tales mudanzas no

impidan reconocer la historia «base» que se está narrando? El cuentacuentos lo atribuye a «[...] su naturaleza viva, autoorganizada, caótica y fractal». El relato oral es «orgánico», se transforma cada vez que es contado y, a pesar de todo, es posible reconocer la historia, una historia que quizás habíamos escuchado con distintos matices, a este u otro narrador.

Pensando en la cita que abre este escrito y en la tesis de Héctor Urién, en el fondo habría pocas historias que contar. A pesar de que la narración oral y la escrita son esencialmente diferentes —Urién las diferencia aludiendo al cine y a la fotografía, a lo dinámico frente a lo estático—, sus argumentos podrían utilizarse de igual modo para referirse a la literatura. Los distintos textos emanarían de un número pequeño de estructuras moldeadas por nodos y conexiones entre ellos, con elementos atractores establecidos. Cada historia se reconocería a través de determinados detalles que forjarían un núcleo identificable; la narración convergería sin remedio a esos elementos fijos, con independencia de lo enmarañado del camino transitado. En el momento de situarse frente a su hoja en blanco, el escritor se enfrentaría a una red compleja con unos pocos ingredientes establecidos, que debería dejar crecer, ramificarse, evolucionar. Las palabras, el talento, la destreza, la creatividad y la técnica harían el resto. Un buen texto sería aquel que, transitando alrededor de esos elementos atractores que definen cada historia, evolucionara seduciendo a los lectores. El placer de la lectura llegaría a través del camino recorrido —elegido por el autor— hasta llegar a esos inevitables nodos que simbolizan y definen el relato. ■

#referencias

Eckermann, Johann Peter. *Las conversaciones con Goethe*. Vol. 2. Iberia. 1982.

Urién, Héctor. *La narración fractal. Arte y ciencia de la oralidad*. Palabras del Candil. 2015.

#glosa

Asumiendo que la estructura de las historias que son contadas puede representarse mediante una red compleja ¿qué relación existiría entre esta red y la de nuestro cerebro? Si una de ellas cambia, ¿afectará a la otra? Quizás un potencial campo de estudio sea la interacción entre estructuras literarias y neuronales. ¿Podemos decir algo acerca de la mente creadora a partir del estudio de un relato? ¿Correlaciona la forma con su apreciación estética? Es interesante la idea de que una historia cambie al ser narrada porque presenta una analogía sorprendente con la manera en que trabaja la memoria: el solo hecho de recordar altera la memoria de lo recordado. De hecho, podemos pensar los relatos como una especie de memoria colectiva. En este sentido, los cambios introducidos en cada nueva narración del relato permitirían que este se adapte a las circunstancias en las que es nuevamente narrado (ver [#Memoria](#), [#Matute](#)).

En el ámbito de la poesía, Agustín Fernández Mallo plantea que lo que él denomina la poesía postpoética «podría y debería ser tratada debidamente [...] como una red compleja [...]» (Fernández Mallo, 2009: 145). Contrapone así la «poesía ortodoxa», una red cerrada, endogámica y en ocasiones aislada, a la «poesía postpoética», entendida como una red abierta, alejada del equilibrio y en permanente intercambio de ideas, estímulos y referencias con otras áreas de la cultura más allá de lo estrictamente poético. Fernández Mallo propone una especie de deconstrucción de la «red compleja de la poesía» en la que los nodos dejen de ser los propios poetas o las instituciones culturales para pasar a ser los poemas y las obras. Es interesante notar que ambas estructuras representan en definitiva dos posibles redes complejas de la poesía. Sin embargo, la decisión de adoptar una u otra es una cuestión estratégica —de poder— que dará como resultado universos culturales muy diferentes.

El lenguaje constituye un buen ejemplo del tipo de problemas que necesariamente requieren un abordaje inter o transdisciplinar. Tras su aparente sencillez y transparencia, el lenguaje esconde una complejidad difícil de desentrañar sin la adecuada combinación de técnicas y enfoques. Como tantos otros problemas complejos, el lenguaje no debe ser estudiado por una ciencia determinista, lineal y con baja tolerancia a las ambigüedades. Para abordar problemas complejos no solo son necesarias herramientas apropiadas sino también un nuevo enfoque, un marco epistemológico adecuado. El análisis del lenguaje a través de las redes complejas plantea una singular hibridación transdisciplinar entre física, matemática y lingüística que abre posibilidades hasta hace poco impensables. ○

Redes complejas: una oportunidad para reflexionar sobre los misterios del lenguaje

Bernat Corominas-Murtra

En el ejercicio de la actividad científica el investigador debe afrontar una permanente sensación de incomodidad y desasosiego. El científico trabaja, por definición, sobre entornos no del todo comprendidos. Cualquiera que se haya adentrado en profundidad en el estudio del lenguaje sabe que este sentimiento de desazón e incomodidad se manifiesta de manera particularmente violenta. La descripción de este desasosiego se recoge en la primera página de la fantástica introducción a la filosofía del lenguaje de Manuel García-Carpintero: «[...] pero cuestionarnos cómo expresáramos eso [el lenguaje] tan cotidiano que sabemos, eso que hemos adquirido con tanta facilidad, basta para sumirnos en la perplejidad» (García-Carpintero, 1996).

El lenguaje encierra una paradójica relación entre la más absoluta cotidianidad y transparencia y el más abismal misterio. La sospecha de que algo tan aparentemente accesible esconde trampas endiabladas alerta al investigador de que el riesgo de una aproximación superficial, aparentemente coherente pero fundamentalmente errónea, no es nada depreciable. Hay varias razones por las que el lenguaje es particularmente inaccesible a una exploración científica cuantitativa y de naturaleza estadística. Menciono dos de ellas. El primer problema lo encontramos en la injerencia del significado. Este es un problema fundamental, inexistente en la física —la interacción entre partículas elementales no desarrolla una función semántica más allá de la mente del investigador—, pero que empieza a aparecer con cierta crudeza en biología, con la emergencia de la función —en un ser vivo los procesos físico-químicos tienen un rol funcional, es decir, tienen un contenido semántico en relación con el entorno y con ellos mismos—. En el caso del lenguaje, la semántica juega un papel primordial en casi todos sus niveles. La búsqueda de la cuantificación o de universales se encuentra siempre amenazada por la condición dinámica del significado y su interpretación forzosamente contextual y relacional. La segunda dificultad se refiere a la sintaxis, y a su potencial exploración usando una aproximación estadística estándar. El argu-

mento clave lo encontramos en un artículo del psicólogo George Armitage Miller y del lingüista Noam Chomsky del año 1963 (Miller & Chomsky, 1963). En él se demuestra matemáticamente cómo la cuantificación estadística es incapaz de penetrar en un fenómeno cuyos observables siguen reglas dependientes de la estructura. La crítica de Miller y Chomsky es fundamental, puesto que la sintaxis humana presenta precisamente este tipo de reglas dependientes de la estructura. Sin embargo, la crítica va más allá del lenguaje, y restringe de forma dramática la capacidad explicativa de la inferencia estadística estándar sobre lo que llamamos «sistemas complejos».

¿Invalidan estos argumentos cualquier aproximación estadística/cuantitativa al lenguaje? Rotundamente no, y la teoría de redes complejas es un claro ejemplo de ello. Las redes complejas pueden aportar un marco válido, al menos para una parte del estudio del lenguaje, proponiendo nuevas interpretaciones de ciertos fenómenos lingüísticos (Solé *et al.*, 2010). Las redes complejas han sido aplicadas a multitud de campos con notables éxitos, desde la propagación de epidemias a la resiliencia de infraestructuras, pasando por el estudio de la estructura de Internet o la red de transporte aéreo. En todos estos casos, los observables del sistema eran fácilmente cuantificables y las relaciones entre elementos claramente definidas. Un estudio basado en redes complejas se caracteriza por i) ser cuantitativo, ii) aportar una información basada en criterios estadísticos, y iii) aportar una información estructural global del sistema. El punto iii) es sin duda el más novedoso, y el que ha hecho de las redes una abstracción poderosa para entender multitud de sistemas complejos.

Un concepto clave en redes es el de navegación. Dependiendo del tipo de red, transitar de un nodo a otro va a implicar un número determinado de pasos. En este contexto, la producción de secuencias de palabras puede ser interpretada como un fenómeno de navegación sobre una red subyacente de conceptos cuyas conexiones están definidas en términos de proximidad conceptual. La visualización de un vocabulario, no como una lista de palabras, sino como una red donde las palabras son nodos y las conexiones relaciones semánticas —perro-animal, por ejemplo— arroja una perspectiva totalmente nueva al concepto «vocabulario», visibilizando una estructura rica y llena de propiedades inesperadas. Quizás la más sorprendente es la reinterpretación de la ambigüedad semántica o polisemia. Mientras que en una visión no estructurada y estática del vocabulario la ambigüedad puede ser entendida como un problema o una imperfección, en el marco de las redes, estos *a priori* indeseados elementos tienen un papel crucial: agilizan de una manera dramática el tráfico de la red y actúan como redirectores entre diferentes regiones conceptuales. En ausencia de vocabulario ambiguo o polisémico, la navegabilidad de la red sufre un deterioro notable. Esta conclusión es válida aun con una noción vaga de «relación semántica», lo que nos libera de los problemas conceptuales relacionados con el significado que he apuntado más arriba.

Otra contribución relevante de las redes complejas se refiere al proceso de adquisición de la sintaxis. Es conocido el hecho de que la sintaxis no se adquiere de manera gradual: a la fase de «una palabra» le sigue la fase de «dos palabras», donde el niño hace construcciones simples tales como «coche rojo» o «caballo corre». Sin embargo, a partir de los dos años se aprecia la emergencia de rasgos gramaticales funcionales, tales como plurales, flexión verbal, uso de verbos auxiliares y preposiciones, entre otros, dando lugar a una gramática «compleja». La emergente complejidad no es gradual, y en el transcurso del desarrollo lingüístico del niño no encontramos una fase de «tres palabras», seguida de una fase de «cuatro palabras», sino que lo que se observa es un cambio cualitativo en la complejidad gramatical a partir de la fase de «dos palabras». Estudios basados en redes en donde las relaciones sintácticas se proyectan como conexiones entre palabras han caracterizado por primera vez de forma cuantitativa las transiciones abruptas que presenta el proceso de adquisición de la sintaxis en la infancia. Es decir, las propiedades de la red sintáctica no evolucionan de forma gradual, sino que sufren cambios bruscos de complejidad, un fenómeno que tiene ciertas similitudes con el concepto de transición de fase, común en la física de sistemas complejos. No debemos olvidar aquí que mediante la proyección de las relaciones sintácticas para construir la red se pierde mucha información; sin embargo, se gana una perspectiva global del sistema. Cuál es el cambio cualitativo que experimentan las estructuras sintácticas durante la maduración cognitiva del niño es otro problema y, como hemos apuntado más arriba, su abordaje plantea retos fundamentales.

Con todas las limitaciones que una aproximación cuantitativa y estadística puede tener sobre un fenómeno tan complejo como el lenguaje, es lícito decir que la capacidad del marco de las redes complejas de aportar visiones nuevas a viejos problemas no se ha agotado. Y esto se debe principalmente a que las redes aportan, por primera vez, un mapa global de relaciones sobre el objeto estudiado; y en el lenguaje, más que en ningún otro sistema, el elemento combinatorio/relacional es crucial. Puede parecer paradójico, pero el alcance de esta exploración dependerá, en gran medida, de la aceptación de sus limitaciones. ■

#referencias

García-Carpintero, Manuel. *Las palabras, las ideas y las cosas: una presentación de la Filosofía del Lenguaje*. Ariel. 1996.

Miller, George A. & Chomsky, Noam. «Finitary models for Language users». *Handbook of Mathematical Psychology*. D. Luce (Ed.). John Wiley & Sons. 1963: 2-419.

Solé, Ricard *et al.* «Language networks: Their structure, function and evolution». *Complexity*. Vol. 15(6). 2010: 20-26.

#glosa

El planteamiento de Corominas-Murtra nos muestra que el análisis del lenguaje mediante el formalismo de las redes complejas permite revelar patrones y fenómenos hasta ahora desconocidos. Sin embargo, es importante señalar que estas propiedades del lenguaje no necesariamente van a ser explicadas dentro del marco teórico de las redes complejas. Lo más probable es que la comprensión del fenómeno surja del propio ámbito lingüístico o de un proceso de iteración inter o transdisciplinar entre este y el análisis de redes complejas. No se trata de reducir toda la lingüística a modelos matemáticos, sino de que estos permitan poner de manifiesto propiedades del lenguaje que no eran evidentes. De hecho el lenguaje humano, debido a su alta complejidad, requiere para su comprensión un enfoque claramente transdisciplinar. Así por ejemplo, Jordi Fortuny presenta en **#Emergencia** las características que debe tener un «sistema de comunicación» —o lenguaje— para que sea eficaz y permita una combinatoria suficientemente rica para poder desarrollar una creatividad lingüística poderosa. Vemos allí cómo con tan solo unas pocas decenas de fonemas podemos lograr un número inmenso de combinaciones para formar palabras cuyos significados van a conectar unas con otras para a su vez crear las redes complejas de las que habla Corominas-Murtra.

Resulta sugerente señalar que el lenguaje natural, que puede modelarse como una red —virtual— de palabras relacionadas entre sí de una determinada manera, es producido e interpretado por otra red, esta vez una red —física— de neuronas en nuestro cerebro. Esto nos conduce al concepto de «red de redes» o «redes anidadas»: una red neuronal que es capaz de producir el lenguaje —una red de palabras— que permite a su vez generar una red de significados para comunicarnos entre personas y establecer redes sociales.

En particular, la red de neuronas de nuestro cerebro es sin duda el sistema más complejo que conocemos. Todas las funciones que el cerebro es capaz de realizar están asociadas a una o varias redes de neuronas. No es de extrañar por lo tanto que las funciones cognitivas, las emociones e incluso la apreciación estética puedan ser estudiadas, en parte, desde modelos de redes complejas. ○

Evolución, redes complejas y detectores de belleza

Albert Flexas Oliver

A menudo oímos que «el ser humano piensa porque tiene manos» y le otorgamos una importancia crucial a la evolución física que llevó a una rama de primates a convertirse en lo que hoy conocemos como *Homo sapiens*. Las pruebas, en efecto, indican que la locomoción bípeda liberó las manos, que ello permitió el uso de herramientas, el control del fuego y todo un cambio de conductas que incluyen el paso a una dieta más blanda y rica en proteínas, que a su vez permitía la reducción de la musculatura masticatoria y la expansión de la cavidad craneal y el importante órgano que contiene. Dicha evolución física, por tanto, conllevaba en todo momento el crecimiento del cerebro, y con ello la capacidad de idear nuevas herramientas y nuevas conductas que a su vez alimentaban la evolución del cerebro.

Sin embargo, a pesar de tener muy claras las características físicas que nos convirtieron en humanos, pocas veces nos planteamos unas capacidades cognitivas más allá del lenguaje, que a menudo se considera que cambió nuestra forma de pensar. Se trata de una visión *lineal* de la evolución cognitiva, que no tiene en cuenta otras características exclusivamente humanas como el juicio moral y la apreciación estética. También se trata de una visión *parcelada* del cerebro. Tendemos a pensar que las habilidades cognitivas están asociadas con zonas cerebrales definidas que se activan en momentos determinados para resolver problemas o llevar a cabo conductas que tienen una utilidad concreta. Por eso la apreciación estética y su estudio son tan importantes. En primer lugar porque la capacidad estética no parece tener utilidad y sin embargo en todo momento evaluamos la belleza de cualquier cosa —cuidamos nuestro aspecto, decoramos nuestras casas, escuchamos música que nos gusta...—. Sin duda es posible observar creaciones bellas en otros animales, pero el ser humano parece ser el único que tiene un «detector de belleza» incorporado y por eso realiza obras sin otra finalidad que la de ser disfrutadas. Ello denota, una vez más, la complejidad del cerebro humano y, si se atiende a los estudios de neuroimagen, pone en tela de juicio esa idea de evolución